

ЛОБЗИН С.А.

ЭЛЕКТР МАШИНАЛАР

ОҚҰЛЫҚ

«Техникалық пайдалану және электрлік пен электрмеханикалық жабдықтарға техникалық қызмет көрсету», КМ.01 «Техникалық қызмет көрсетуді ұйымдастыру және электрлік пен электрмеханикалық жабдықтарды жөндеу», ПАК.01.01 «электр машиналар мен құрылғылар» мамандығы бойынша ОКБ бағдарламасымен іске асырылған, оқу үдерісінде білім беру мекемелерінде оқулық ретінде пайдалану үшін «Білім беруді дамыту Федералды институты» Федералды мемлекеттік автономды мекемесі тарапынан ұсынған

*Пікірдің тіркеу нөмірі 191,
10 мамыр, 2012 жыл «БДФИ» ФММ*

2-басылым, стереотипті



Мәскеу
«Академия» баспа орталығы
2016

ӘОЖ 621.3(075.32)
КБЖ 31.2ші723
Л681

Бұл кітап Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі және «Кәсіпқор» холдингі» КЕАҚ арасында жасалған шартқа сәйкес ««ТЖКБ жүйесі үшін шетел әдебиетін сатып алуды және аударуды ұйымдастыру жөніндегі қызметтер» мемлекеттік тапсырмасын орындау аясында қазақ тіліне аударылды.

Аталған кітаптың орыс тіліндегі нұсқасы Ресей Федерациясының білім беру үдерісіне қойылатын талаптардың ескерілуімен жасалды.

Қазақстан Республикасының техникалық және кәсіптік білім беру жүйесіндегі білім беру ұйымдарының осы жағдайды ескеруі және оқу үдерісінде мазмұнды бөлімді (технология, материалдар және қажетті ақпарат) қолдануы қажет.

Аударманы «Delta Consulting Group» ЖШС жүзеге асырды, заңды мекенжайы: Астана қ., Иманов көш., 19, «Алма-Ата» БО, 809С, телефоны: 8 (7172) 78 79 29, эл. поштасы: info@dcg.kz

Пікір беруші —

Ресей Федерациясы Үкіметі жанындағы Халық шаруашылығы академиясының көп деңгейлі кәсіби білім колледжінің компьютерлік оқыту орталығының сектор меңгерушісі *Соломашкин А. А.*

Лобзин С.А.

Л681 Электрикалық машиналар: орта кәсіби білім мекемелерінің білімгерлеріне арналған оқулық / С.А.Лобзин. — 2-басылым, стереотиптік. — М. : «Академия» баспа орталығы 2016. — 336 б.

ISBN 978-601-333-225-3 (каз)

ISBN 978-5-4468-3059-6 (рус)

Генераторлар теориялары мен тұрақты ток қозғалтқыштардың, трансформаторлардың, асинхронды қозғалтқыштардың және синхронды машиналардың негіздері мазмұндалған. Электр машиналары мен трансформаторлардың жұмыс қағидалары негізделген физикалық құбылыстарға көп көңіл бөлінеді. Түрлі электр машиналарының жалпы қасиеттері қарастырылған.

Оқулық НП.10 «Электр машиналары» жалпы кәсіби пәнін оқып үйренуге «Технологиялық үдерістер мен өндірісті автоматтандыру» мамандығы бойынша, сондай-ақ «Электр және электрмеханикалық жабдықты жөндеу және техникалық қызмет көрсетуді ұйымдастыру» КМ.01 кәсіптік модульді меңгеру үшін «Электрлік және электрмеханикалық жабдықты техникалық пайдалану және техникалық қызмет көрсету» мамандығы бойынша пайдаланылу мүмкін.

Орта кәсіптік білім беру мекемелерінің білімгерлеріне арналған.

ӘОЖ 621.3(075.32)

КБЖ 31.2ші723

ISBN 978-601-333-225-3 (каз)

ISBN 978-5-4468-3059-6 (рус)

© Лобзин С.А., 2012

© «Академия» баспа орталығы, 2012

© Рәсімделген. «Академия» баспа орталығы, 2012

Оқулықта материалды зерделеудің келесі реттілігі қабылданды: тұрақты ток машиналар (жалпы сұрақтар, генераторлар, қозғалтқыштар); трансформаторлар; айнымалы ток машиналары (жалпы сұрақтар, асинхронды қозғалтқыш, синхронды генераторлар, синхронды қозғалтқыштар). Сондай-ақ, кейбір арнайы машиналардың түрлері қарастырылады. Электр машинаны жасаудың даму келешегіне қатысты мәселелер талқыланады.

Электр машиналары мен трансформаторлар жұмыстарының қағидаларын анықтау үшін, физикалық құбылыстарға көп көңіл бөлінеді. Мәтінде, еске түсіру мақсатымен қаралып отырған мәселелерге байланысты физика, математика, электротехника және техникалық механика курстарынан материалдар берілген. Осылайша, көптеген жағдайларда, басқа білім беру және анықтамалық бағылымдарда осы материалды түсіну үшін, тиісті ақпаратты іздеудің қажеті болмайды.

Автор, тақырыпты өз бетінше зерттеу үшін, материалды толық қолжетімді етіп көрсетуге тырысты.

Оқулықта әртүрлі электр машиналарының жалпы қасиеттеріне, сондай-ақ, түрлі құбылыстардың ұқсастығына нұсқаулар бар. Өткен тақырыптарға, суреттерге және формулаларға көптеген сілтемелер берілген. Курсты дұрыс меңгеру үшін, білімгерлерге негізгі мәтін барысында берілген сілтемелерді, сондай-ақ ескертулер мен анықтамаларды ескеруге кеңес беріледі.

Әр тараудан кейін пәнді меңгеруге көмектесетін сұрақтар қойылады.

Электр машиналары мен трансформаторлар туралы жалпы ақпарат.

Электр машиналары механикалық электр энергиясын электрлік және электрлікті механикалыққа түрлендіру үшін, сонымен қатар кернеуді, оның жиілігін және т.б., түрлендіру мақсатымен қолданылады. Электр машиналар мен трансформаторлардың жұмысы электрмагниттік индукция құбылысына негізделген.

Механикалық энергияны электр энергиясына айналдыруға арналған машиналар *электр генераторлар (электрмашиналық)* деп аталады; кері түрлендіруге арналған электр машиналары *электр қозғалтқыштары* деп аталады. Ток түрін түрлендіру үшін, қолданылатын машиналар (мысалы, айнымалы тоқты тұрақты токқа), айнымалы токтың фазалар жиілігі мен сандарын түрлендіру, бір кернеудің тұрақты тогын басқа кернеудің тұрақты тогына түрлендіруі *электрмашиналық түрлендіргіштер* деп аталады.

Электрмашинасында айналмалы бөлік (ротор) және қозғалмайтын бөлік (статор) бар. Электрмашиналарына қайтымдылық сипаты тән, бұл машина генератор режимінде де, қозғалтқыш режимінде де жұмыс жасай алады.

Электр машиналары, қандай ток түрін түрлендіретіне немесе тұтынатына байланысты, айнымалы және тұрақты ток машиналарын ажыратады.

Айнымалы ток машиналары синхронды және асинхронды болып бөлінеді. Жұмыс кезінде, екі машиналарда да айналымдағы магнит өрісі пайда болады. Синхронды машинаның роторы статор магнит өрісінің айналу жылдамдығына тең жылдамдықпен айналады. Асинхронды машина роторының айналу жылдамдығы статордың өрісінен өзгеше болады.

Айнымалы ток машиналары бір фазалы және көпфазалы (көбінесе үш фазалы) болады; біріншілері түрлендіреді немесе бір фазалы ток тұтынады, екіншілері - көпфазалы ток тұтынады.

Тұрақты ток машиналары коллектормен жабдықталған. Генераторда, коллектор тұрақты бағыттағы ЭҚК / ЭДС (Электр қоздырушы күш) қабылдау үшін, ал қозғалтқышта өзгермейтін бағытта айналмалы кезін қамтамасыз ету мақсатында, ротордың (зәкірдің) орама

бөліктерінде токтарды ауыстыру үшін қызмет етеді.

Өздерінің конструкциясы мен жұмыс істеу қағидаларында, әртүрлі машиналар ерекшеліктерін біріктіретін машиналар бар. Мысалы, іс жүзінде (әлі өте кең таралмаған) генераторлар, қозғалтқыштар ретінде, сондай-ақ жиілікті түрлендіру үшін қолданылатын *асинхрондалған синхронды машиналардың* тамаша қасиеттері бар.

Кеңейтілген пайдалану саласындағы машиналардың тағы бір мысалы - айнымалы немесе тұрақты токтың желісінен жұмыс істейтін *амбебап коллекторлы қозғалтқыштар*. Коллекторлы қозғалтқыштар синхронды және асинхронды машиналарға қарағанда, айтарлықтай жоғары айналу жылдамдығын алуға және кең ауқымда жылдамдықты басқаруды жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Олардың қолдану саласы жоғары шығындармен, қызмет көрсетудің күрделілігімен және жұмыстағы сенімділіктің төмендігімен шектеледі.

Осында берілген электр машиналардың қысқа жіктелуі, олардың сан алуандығын қарастырмайтынын атап өтейік.

Термин мағынасы бойынша, машиналар болмайтын *трансформаторларды* электр машиналармен бірге бір курста үйрену әдетке айналған. Трансформатор - айналмалы бөлігі жоқ және алдымен бір кернеудің айнымалы тогын, басқа кернеудің айнымалы тогына түрлендіруге арналған, статикалық құрылғы. Трансформатордың жұмыс істеу қағидасы, электр машиналарының қағидасы сияқты электрмагниттік индукция құбылысына негізделген, ал оның қасиеттерін сипаттайтын теңдеулер электр машиналарының, атап айтқанда, асинхронды қозғалтқыштардың теңдеулеріне ұқсас келеді. Трансформаторлар мен асинхронды қозғалтқыштарды орналастыру сұлбалары мен векторлық диаграммалары өте ұқсас.

Электр машиналары мен трансформаторлар арасындағы ұқсастық, әсіресе, құрылымда, индукциялық реттегіш пен фазалық реттегіштің жұмыс қағидаларында айқын көрінеді. Осы құрылғылар, 360° шегінде еркін бұрыштарға бұруға қабілетті, тежелген ротормен пайдалынатын арнайы жасалған асинхронды қозғалтқыштар болады.

Бірнеше қызметтері бар трансформаторлардың көптеген түрлері болады. Жалпыға ортақ пайдалынатын қуатты трансформаторлар, электр энергиясын беру және тарату желілерінде қолданылады. Электр энергиясы электр станцияларында ондаған киловольт кернеулікте түрлендіріледі, бірақ анағұрлым жоғары кернеу, ұзақ қашықтықта энергияны үнемдеп тарату үшін пайдалынады.

Кернеуді арттыру үшін, қуатты күшейтетін трансформаторлар қолданылады. Әдетте, жүздеген вольт кернеуді қажет ететін электр қуат тұтынушыларына, қуатты азайтатын трансформаторлар жақын жерге орнатылады.

Арнайы қызмет трансформаторларына арнайы қуатты (түзеткіш, дәнекерлеу, пештік, радиотрансформаторлар) өлшейтін және сынақ трансформаторлары, фазалардың санын түрлендіруге арналған трансформаторлар, ЭҚК қисық сызығының пішіндері, жиіліктер және т.б. жатады.

Айналмалы электр машиналар тарихынан ақпарат. Ағылшын физигі және химигі Майкл Фарадей 1821 жылы, өткізгіш арқылы өтіп жатқан электр тогының сол өткізгішті магнит айналасында айналдыра алатын және өткізгіш айналасындағы магнитті айналдыра алатын мүмкіндігі бар екенін анықтады. Мысалы, М. Фарадей тәжірибесі электр қозғалтқышының қағидалық құру мүмкіндігінің көрнекі мысалы болды. М. Фарадей 1831 жылы электр машиналар мен трансформаторлардың қызметтер қағидалары негізделген, электрмагниттік индукция құбылысын ашып, «магнетизмнің электр қуатына айналу» мүмкіндігін көрсетті.

Ресейлік физик Эмилий Христианович Ленц, 1832 жылы, оған электр машинаның генераторлық және қозғалту режимінің қайтымдылық қағидасын тұжырымдауға мүмкіндік берген, ЭҚК индукциясы мен индукциялық ток бағытын анықтады.

Сол жылы, анонимді өнертапқыш алғашқы бір фазалы синхронды көп полюсті генератор жасады.

Американдық физик Джозеф Генри, 1834 жылы «Магниттік тартылыс пен серпіннен туындайтын теңселме қозғалысы туралы» мақаласын жариялады, онда ол өзі құрған электр қозғалтқышын сипаттады. Осы құрылғыда, алғаш рет үздіксіз қозғалысты (осы жағдайда, тербелмелі) алу үшін, әр аттас өрістердің тартылысы және аттас магниттік өрістердің серпінісін қолдануға әрекет жасалды.

Сол жылы, ресейлік физик Борис Семенович Якоби зәкірдің айналмалы қозғалысымен бірінші тұрақты ток қозғалтқышын жасап, сипаттады. Қозғалтқыш гальваникалық батареялардың элементтерінен қуат алған. Машинаны қоздыру тұрақты магниттермен жүзеге асырылады.

Э.Х. Ленц, 1838 жылы электр машинаның қайтымдылығын генератор тәртібінде де, қозғалтқыш тәртібінде де іске қосып, тұрақты тогы бар тәжірибе жүзінде іске асырды. Дегенмен, қайтымдылық

қағидасын кең ауқымды пайдалану тек XIX ғасырдың 70 - жылдарында басталды.

Б.С. Якоби XX-ғасырдың 40-шы жылдарында қозғалтқыштардың көптеген конструкцияларын жасады. Дегенмен, гальваникалық батареялар тоғынан электр қозғалтқыштарын қуат беру кезінде механикалық энергия тым қымбат болатыны анықталды; нәтижесінде, электр қозғалтқыштарының аса тиімсіздігі танылды. Көптеген көлік қондырғыларына тиімсіз болатын, көп батареялар пайдалануды қажет етіп, гальваникалық батареялардың аз энергия жұмсауы (яғни, масса бірлігіне, қуаттың төмен келуі) олардың үлкен кемшілігі болып табылады. Б. С. Якоби, жасаған тәжірибелердің, сонымен қатар электр машинасының теориялық зерттеулерінің негізінде өте маңызды қорытындыға келді: электр қозғалтқыштарын көп немесе аз пайдалану туралы мәселе шешімі, электр энергия құнын төмендетуге тікелей байланысты болады, яғни гальваникалық батареяларға қарағанда үнемді генератор жасау болып табылады. Б.С. Якоби, 1842 жылы бірінші тұрақты ток генераторын жасаған.

XIX ғасырдың 40-60 жылдары салынған электр қозғалтқыштарының кейбіреулері, болат өзегін соленоидқа тарту қағидасы бойынша қызмет етті; нәтижесінде пайда болатын қайтымды ілгерілеме қозғалысы теңгергіш немесе сермер доңғалақтар жүрісінің біркелкілігі үшін, қосиінді-бұлғақты механизмнің айналмалы білік көмегімен түрленді. Олар, мысалы, Пейдж және Бурбуз электр қозғалтқыштары.

Итальяндық ғалым Антонио Пачинотти, 1860 жылы айналатын электр магниттердің магнит өрісінде, сақиналық айқын емес полюсті зәкірі бар электр қозғалтқышын жасады. Пачиноттидің ең басты жұмысының бірі - ол қазіргі заманғы тұрақты ток құрылысын салудың маңызды қадамы болды: айқын полюсті зәкір айқын емес полюстіге ауыстырылды. Осыған, ыңғайлы қоздыру сұлбасын және заманауи түрдегі коллекторды қосу қажет.

А. Пачинотти қозғалтқышының тұрақты айналмалы сәті болған. А. Пачинотти, өз қозғалтқышының генераторға айналдыру мүмкіндігін айта кеткен. Дегенмен, машинаның өзін-өзі қоздыра алатын мүмкіндігі туралы білмей, генератор тәртібінде машинаны қолдану үшін, электр магниттерді тұрақты магнитпен ауыстыруға кеңес берді. А. Пачинотти, 1863 жылы электр машиналардың қайтымдылық қағидасын көрсетті және металдың электролиттік (электролиз) өндіру мен ұзақ қашықтыққа электр энергиясын беру үшін,

тұрақты токтың электрлік генераторларын пайдалану мүмкіндігі туралы идеясын ұсынды.

Бельгияда туылған және Францияда жұмыс істеген Зеноб Теофил Грамм, 1867 жылы салыстырмалы түрде арзан электр энергиясын алуға мүмкіндік беретін алғашқы сенімді және кәдімгі электр машина генераторын жасаған. Сол уақыттан бері, электр байланыс қондырғылардың жұмыс істеуін қамтамасыз ететін ағымдағы ток көздері артта қалып бастады.

З.Грамм жасаған әкір генераторында, А.Пачинотти ойлап тапқан машинасы сияқты сақина конструкциясы болған. Неміс электротехнигі Фридрих фон Хефнер-Алтенек, сақиналы әкірді барабанмен ауыстырды, бұл әрекет электр машинасының қуатын екі есе ұлғайтты және конструкцияны айтарлықтай жеңілдетті.

Ағылшын ғалымы Уильям Бэйли, 1879 жылы тұрақты ток көзіне төрт ағымдық электромагнит орамаларын кезекпен қосу арқылы, айналмалы магнит өрісін алған айнымалы токтың көп фазалы электр машиналарын жасау үшін негізін салды. Операциялық қағидалары айналмалы магнит өрісінің қасиеттеріне негізделген алғашқы құрылғылар Марселя Депренің (Франция, 1880-1883) және Элиа Томсонның (АҚШ, 1887) шығармаларында сипатталған.

Алғашқы екі фазалы индукциялық қозғалтқышты 1888 жылы Хорватия инженері Никола Тесла ойлап тапты. Алайда, XIX- ғасырдағы ең ірі электр станциясында екі фазалы айнымалы ток тізбегінің іске асырылуына қарамастан, қозғалтқыштың бұл түрі іске қосу сипаттамаларының нашарлығына байланысты қолданылмады.

Сол жылы, ресейлік электротехнигі Михаил Осипович Доливо-Добровольский қуаты 2,2 кВт болатын, үш фазалы айнымалы ток генераторын және толық мыстан жасалған цилиндрді көрсететін, қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқышты жасаған. Алғашқы асинхронды қозғалтқыштардың ПЭК/КПД (Пайдалы әсер коэффициенті, тұрақты ток қозғалтқыштар қуаты бойынша ұқсас ПЭК-ке қарағанда айтарлықтай төмен болды.

Н. Тесла, 1889 жылдан бастап жоғары вольтты энергетикалық жүйені және жоғары жиіліктегі токтарды зерттеп келді, бұл 1891 жылы жоғары жиілікті трансформаторлар (Тесла трансформаторлары) мен жоғары жиілікті электрмеханикалық генераторлар жасауға септігін тигізді.

М. О. Доливо-Добровольский, 1889 жылы «беличья клетка» (тиын торына ұқсас) деп аталып кеткен қысқа тұйықталған ротор-

дың жаңа конструкциясына патент алды. Ротор болат цилиндр ретінде жасалған еді, ал оның шеткі жарық арналарына ротордың маңдайлы бөлігінде қосылатын электрлік мыс өзектер салынған болатын.

Мыс ротордың алдындағы «беличья клетка» артықшылығы, кіші электрлік кедергісімен қатар, оның жоғарғы магнитті өткізгіші бар, яғни қозғалтқыштың айналу сәтін арттыратын төмен магнитті қарсылыққа ие болады. «Беличья клетка» құрылғысы бүгінгі күнге дейін өзгерген жоқ.

М. О. Доливо-Добровольский, 1890 жылы статор орамасы сияқты, бөліктер саны бірдей үшфазалы орамасы бар асинхронды қозғалтқыштың фазалық роторын патенттеді. Фазалық ротор орамасының өткізгіштері байланыс сақиналары мен іске қосу реостатымен щеткалар арқылы қосылады. Фазалық ротор айналу жылдамдығын едәуір азайтуға және айналу жылдамдығын реттеуге мүмкіндік береді.

Екі жыл өткеннен кейін, М.О. Доливо-Добровольский «қос беличья клетка» (Двойная беличья клетка) деп аталатын ротор конструкциясын ұсынды. Осындай ротордың айтарлықтай жақсартылған іске қосу сипаттамалары бар. Француз инженері Поль Бушери, 1898 жылы «Қос беличья клетка» (двойная беличья клетка) конструкциясын жетілдірді, содан кейін ол кеңінен қолданыла бастады.

М. О. Доливо-Добровольский, 1891 жылы Майндағы Франкфуртта дүниежүзілік электротехникалық көрмесінде әлемдегі алғашқы, шамамен 170 км қашықтықта үш фазалы электр қуат тарату жүйесін көрсетті және үш фазалы айнымалы тоқты өнеркәсіпте қолдануды ұсынды. Тұрақты тогының электр жетегі тез арада үш фазалы электр жетегімен ауыстырылды. Дегенмен, ұзақ уақыт бойы тұрақты ток машиналары илемдік орнақтардың электр жетектерінде, дәнекерлеуші-генераторларда, генераторлық-қозғалтқыш түріндегі көлік жүйелерінде, сондай-ақ айнымалы ток синхронды генераторларының қозғалтқыштары (магниттік ағындар көздері) ретінде ұзақ уақыт қолданылды. Тұрақты ток машиналары XX ғасырдың соңына қарай аталған оқиғаларда өзінің маңыздылығын жоғалта бастады; олар ионды және жартылай өткізгіш электроникасымен ауыстырылды.

XX ғасырдың ортасында, тұрақты тогының шағын қозғалтқыштарында айнымалы ток қозғалтқыштарына қарағанда ең жоғары дәлдігі мен айналыс жиілігін реттеу диапазоны бар екені анықталды. Содан кейін, тұрақты ток машиналары автоматтандырылған басқару жүйелерінде және тұрмыстық электр құрылғыларында кеңінен қол-

даныла бастады.

Осылайша, тұрақты және айнымалы ток машиналары біртіндеп өздерінің жеке текшелерін алды; әр машина түрлерін белгілі бір салада қолдану абзал.

Айнымалы ток машиналарының ең маңызды қолдануы, бұл үш фазалы синхронды генераторлармен электр қуатын өндіру: жылу және атомды электр станцияларында турбогенераторлармен және су электр станцияларында гидрогенераторлармен. Салыстырмалы қарапайым конструкциясы бар синхронды генераторлар, айтарлықтай жоғары кернеуде үлкен ток алуға мүмкіндік береді.

Қазіргі генераторлар, щеткасыз қоздыру жүйесімен және автоматты электронды реттеумен жасалынады. Бірнеше метрлі генераторлардың көлемдерінде, олардың маңызды бөліктері миллиметрге дейінгі дәлдікпен жасалынады. Ресейде, электр станцияларында орнатылған генераторлардың жалпы қуаты үнемі өседі, бұл электр қуатын тұтыну өсіміне сәйкес келеді.

Мысалы, 1998 жылы ресейлік электр станцияларының белгіленген қуаты 198 млн. кВт, ал 2010 жылы бұл көрсеткіш 232 млн. кВт-қа дейін өседі деп болжануда, оның 25 млн кВт атом электр станцияларында (АЭС) турбогенераторлармен, шашамен 157 млн кВт жылу электр станцияларындағы (ЖЭС / ТЭС) турбогенераторлармен, ал 50 млн кВт гидроэлектр станциялардың (ГЭС) және гидроаккумуляторлық электр станциялардың (ГАЭС) гидрогенераторларымен өндіріледі. Өз ресурсын тауысқан жабдықтарды ауыстырып, электр станцияларында жаңа өндіруші қуаттарды іске қосу 1999 жылдан 2010 жылға дейінгі мерзімде шамамен 50 млн кВт құрайды деп жоспарланған.

Сайып келгенде, соңғы уақытта Ресей электр станцияларында, олардың ішінде «Мосэнерго» ААҚ / ОАО (ашық акционерлік қоғам) станцияларында кең қолданылатын асинхрондалған синхронды машиналарға назар аударуымыз керек. Осындай машиналардың дамуы XX-ғасырдың 60-шы жылдары басталды. Техникалық ғылымдар докторы, шахмат бойынша әлем чемпионы Ботвинник Михаил Моисеевич олардың дамуына елеулі үлес қосты. Асинхрондалған машиналар немесе қосарлы қуат беру машиналардың, әртүрлі жиілікте кернеуі берілген статор мен ротордың бөлек қуат беру көздері бар. Осы машиналарды синхронды емес жұмыс режимдеріне қолдануға рұқсат берілген. Әдеттегі синхронды машиналармен салыстырғанда, синхронизмнен шығып қалудан тұрақтылығы, соның ішінде реактив

куатын пайдалану режимінде болуы, асинхрондалған машиналардың басты артықшылығы болып табылады. Күрделі энергетикалық жүйелерде жұмыс істеген кезде асинхрондалған машиналардың қасиеттері аса құнды болады.

Трансформаторлардың тарихынан ақпарат. Трансформаторлар тарихының басталуы, Михаил Фарадей электр магниттік индукция құбылысын ашқаннан кейін, дәл сол М. Фарадей мен американдық ғалым Джозеф Генридің болашақ трансформатордың алғашқы бейнелері пайда болған туындыларымен байланыстыруға болады (бұл 1831 жылы, электромагниттік индукцияны ашқан жылы болған). Дегенмен, екі ғалымның біреуі де, құрылғының кернеу мен тоқты өзгерту қасиеттерін атап көрсетпеді.

Неміс зерттеушісі Генрих Даниель Румкорф, 1848 жылы трансформатордың болашақ үлгісі болатын индукциялық шарғыны ойлап тапты.

Яблочков Павел Николаевич өзінің өнертабысына 1876 жыл 30 қарашасында патент алған, осы күн бірінші трансформатордың туған күні болды. Яблочковтың трансформаторында ашық өзек болған; ол орамалар оралған өзекше еді.

Англияда, ағайындар Джон және Эдуард Гопкинсон 1884 жылы алғашқы тұйықталған өзектерді жасады.

Американдық инженер Вильям Стенли, 1885 жылы алғашқы автотрансформаторды ойлап тапты.

М.О Доливо-Добровольский, 1889 жылы алғашқы үш фазалы трансформаторды жасап шығарды.

Сол жылы, Д. Свинберн өзек пен трансформатордың орамаларын маймен салқындатуды ұсынды.

Ағылшын зерттеуші-металлург Роберт Хедфилд, 1900-жылдардың басында темірдің қасиеттеріне әр түрлі қоспалардың әсерін анықтау үшін, бірқатар тәжірибелер жүргізді. Бірнеше жылдан кейін, ол тапсырыс берушілерге кремний қоспалары бар трансформаторлық болаттың алғашқы тоннасын жеткізді.

Мәскеулік трансформатор зауыты (бұдан әрі - Мәскеу электр зауыты) жұмыс істей бастаған 1928 жылды, біздің еліміздегі қуатты трансформаторлар өндірісінің жылы деп санауға болады.

Трансформаторлар өзегін өндіру технологиясы, 30-шы жылдардың басында алға жылжыды. Американдық металлург Норман П. Гросс, XX-ғасырда кремнийлі болат жаймасы мен жылытудың біріккен әсерімен жайма бағытында керемет магниттік қасиеттер пайда

болады: магнит өткізгіштігі бес есе артады, ал гистерезиске байланысты шығындар төрт есе азаяды.

Қазіргі кезде, трансформаторлардың мыңдаған түрлі конструкциялары белгілі – шағын көлемнен бастап, тасымалдау үшін арнайы теміржол платформаларын немесе күшті қалқыма құралдарын қажет ететін алып көлемділері болады.

Көптеген энергетикалық нысандарда маймен жұмыс істейтін трансформаторлары орнатылған. Алайда, олардың жарылу қауіпі бар. Ыстық майдың шығарылуына байланысты, осындай трансформатордың жарылуы өртке әкеледі. Оларды жарылыс қауіпі жоқ, құрғақ трансформаторлармен ауыстырып жатыр. Олар улы және коррозиялық газдар шығармайды, үнемді және ылғалға төзімді болып табылады.

Трансформаторлардың одан әрі дамуы, магниттік материалдардың жаңа санатын қолдана отырып, атап айтқанда аморфты және нанокристалдық қоспаларға байланысты болады. Олардан жасалған біліктер, өте төмен шығынмен, бастапқы және ең жоғарғы магнит өткізгіштігі мен жоғарғы жиілікте қанықтыру индукциясының жоғарғы маңызымен сипатталады. Қазірдің өзінде, аморфты қоспалар радио электронды құрылғыда, кеңжолақты байланыс құрылғыларының трансформаторларында, 0.5 МГц және одан жоғары жиіліктерінде ондаған мегаваттқа дейін, импульс қуатымен импульсті трансформаторларда, ток пен кернеу өлшеу трансформаторларында, үйлестіруші трансформаторларында және т.б., кең таралған.

Қуатты трансформаторлардың қуатын арттыру жолында, жоғарғы өткізгіш технологиясын пайдаланудың үлкен келешегі ашылады.

ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫ



БӨЛІМ

1-тарау. Жалпы сұрақтар

2-тарау. Тұрақты ток генераторлары

3-тарау. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ЖАЛПЫ СҰРАҚТАР

1.1. ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЫНЫҢ ӘРЕКЕТ ҚАҒИДАСЫ

Біртекті магнит өрісіндегі өткізгіштің ілгерілемелі қозғалысы. Мысалы, магнит өрісінің күш сызықтарына перпендикуляр тұрақты магнит полюстерінің арасында өткізгіш болсын (1.1 – суретті қараңыз). Полюстерде магнит өрісі біртектес және B индукция арқылы сипатталады, ал полюстерден тыс өріс жоқ деп есептейік. Магниттік өрістердің бағыты (магниттік индукция сызықтары) 1.1. - суретте диагональді крестермен көрсетілген (сызбада сызықтар оған перпендикуляр енгізілген) және магнит өрісінің аймағы штрих сызықпен шектеледі.

Мысалы, F сыртқы күш әсерінен өткізгіш магнит өрісінің күш сызығына да, өткізгішке де перпендикулярлы v жылдамдықпен қозғалсын деп есептейік. Қарастырылып жатқан, өткізгіштің ауысуы бағыттауыштар сияқты, екі параллельді сымдар арқылы 1.1-суретте көрсетілгендей болады. Қозғалып жатқан өткізгіш күш сызығын кесіп өтетін болса, осы өткізгіште *ЭҚК индукция* деп аталатын электр қоздырушы күш (ЭҚК) бар.

E индукциясының ЭҚК магнит өрісінің B индукциясына, өткізгіштің v қозғалу жылдамдығына, сондай-ақ l өткізгіштің белсенді ұзындығына тәуелді болады (магнит өрісінің ішінде өткізгіш бөлігінің ұзындығына байланысты):

$$E = Blv. \quad (1.1)$$

Осы қалпында ЭҚК өрнегі бұрын сипатталған жағдайда орынды болған: өткізгіштің белсенді бөлігі магниттік индукция сызықтарына перпендикуляр, ал өткізгіштің жылдамдығы өткізгіштің өзіне және магниттік индукция сызықтарына перпендикуляр болады. Экспресс (1.1) электромагниттік индукция заңының нысаны ретінде қарастырылуы мүмкін.

Өрнекті (1.1) *электромагниттік индукция заңын* ұсыну нысаны ретінде қарастыруға болады.

Қозғалмалы өткізгіште пайда болатын индукцияның ЭҚК бағытын, *оң қол ережесімен* анықтайды:

- Алақанды, оған магнит өрісінің сызықтары тік бұрыштан енетіндей етіп орналастырады;
- Тік бұрышпен басқа ұзартылған төрт саусаққа бүктелген үлкен саусақпен, өткізгіш қозғалысының жылдамдығын бағдарлайды;
- Төрт саусақ ЭҚК бағытын көрсетеді.

Егер қарастырылып отырған өткізгішті магнит өрісінің шегінен тыс жүретін тұйық тізбекке қосса, онда индукцияның ЭҚК әсерінен электр тогы тізбектің бойымен ағады. 1.1 - суретте осы тізбек екі параллель бағыттаушы сымдармен және R қарсылықтың энергия қабылдағышымен қалыптастырылды. Ішкі тұйықталған тізбектегі I ток бағыты ЭҚК бағытына сәйкес келеді.

Осылайша, қарастырылып жатқан өткізгіш қозғалған сәтте, электр тогы пайда болады. Бірақ, магниттік өріске орнатылған ток өткізгішіне $F_{\text{эм}}$ *электрмагниттік күш* әсер етеді, сондай-ақ ол Ампер күші деп аталады. Осы жағдайларда, ток бағыты магнит өрісінің күштеріне перпендикуляр болғанда, электрмагниттік күш шамасы

$$F_{\text{эм}} = BIl. \quad (1.2)$$

арқылы беріледі.

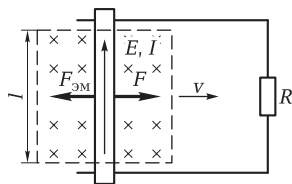
Электрмагниттік күш бағытын *сол қол ережесімен* анықтайды:

- Сол қолдың алақанын, оған магнит өрісінің сызықтары тік бұрыштан енетіндей етіп орналастырады;
- Төрт ұзартылған саусақтарды ток бағытына қарай бағыттайды;
- Тік бұрышпен басқа ұзартылған төрт саусаққа бүктелген үлкен саусақ, электр магнитті күш жылдамдығын көрсетеді;

Қарастырылып жатқан тогы бар өткізгішке сол қол ережесін қолданып, $F_{\text{эм}}$ күші сыртқы F күшіне қарсы (және өткізгіштің қозғалыс жылдамдығына қарсы) бағытталғанын анықтаймыз.

Ньютонның екінші заңына сәйкес, денеге әсер ететін күштердің тең әсерлі күші, осы денеге тең әсерлі күшке пропорционалды жыл-

1.1.–сурет. Генератордың жұмыс істеу сұлбасы



дамдықты хабарлайды. Егер дененің жылдамдығы нөлге тең болса (яғни, дененің жылдамдығы тұрақты болса), онда тең әсерлі күш нөлге тең болады. Қарастырылып отырған жағдайда, егер өткізгіштің v жылдамдығы тұрақты болса, сыртқы және электрмагниттік күштің тең әсерлі күші нөлге тең болады. Себебі, F және $F_{\text{эм}}$ күштері қарама-қарсы бағытталған, сондықтан көрсетілген шарт осы модульдер тең болған кезде орындалады:

$$F = F_{\text{эм}} \quad (1.3)$$

Сонымен, қарастырылып жатқан үлгіде (1.1-суретті қараңыз) екі үдеріс өте маңызды болады:

- магнит өрісінің индукция сызықтарын кесіп өтетін, өткізгіште бағытталған индукцияның ЭҚК әсерінен токтың пайда болуы;
- ток пайда болған өткізгіште әрекет ететін электрмагниттік күштің пайда болуы; осы күштің бағыты, өткізгішті жылжытатын сыртқы күшке қарама-қарсы болады.

Индукциялық токпен бірге жүретін, тежеуші электрмагниттік күшінің пайда болуы, *электр энергиясын өндіру үшін, электрмагниттік күшті жеңетін сыртқы күш қолдану қажет* екенін дәлелдейді. Бұл энергияны сақтау заңына сәйкес келеді. Жоғарыда сипатталған құбылыстар, механикалық энергияның электр энергиясына айналдыру үдерісін бейнелейді.

Күш модульдерінің теңдігін (1.3) өрнекті (1.2) есепке алумен көшіріп жазайық:

$$F = BIl \quad (1.4)$$

Дененің қозғалыс бағыты бойынша, әсер ететін күштің механикалық қуаты, осы күштің қозғалу жылдамдығына әсер етуші күш ретінде көрсетілу мүмкіндігі физика курсынан белгілі: $P_{\text{мех}} = Fv$. (уақыт бірлігіне күшпен өндірілген қуат, жұмысты білдіретінін еске сала кетейік). Сонда өрнектің екі бөлігін жылдамдыққа (1.4) көбейтіп

$$P_{\text{мех}} = BIlv$$

алуға болады.

Өйткені, формула бойынша (1.1), $E = Blv$, болады

$$P_{\text{мех}} = EI = P_{\text{эм}} \quad (1.5)$$

Мұндағы $P_{\text{эм}}$ - *электрмагниттік қуат*. (Электр қуат көзінің қуаты осылайша $P_{\text{и}} = EI$ болып көрсетілгенін электротехника курсынан есімізге түсірейік.)

Өрнек (1.5), *магнит өрісінде өткізгіш қозғалысының механикалық*

күші электр магниттік қуатына айналатынын көрсетеді.

Тұрақты ток генераторының үлгісі. Ендеше, 1.2, *a* - суретте көрсетілген, қарапайым үлгі мысалында тұрақты ток генераторында сипатталған үдерістер қалай қолданылатынын қарастырайық. Тұрақты магнит өрісінде, алғашқы қозғалтқыштың көмегімен цилиндрлік өзек пен оған орнатылған өткізгіш айналымнан тұратын зәкір айналады. Полюстер бойымен орналасқан ораманың белсенді бұрыштарында индукцияның ЭҚК енгізіледі. 1.2 – суретте көрсетілген ЭҚК бағыты әрбір белсенді жағынан магниттік өрістердің бағытын ескере отырып, оң жақ ереже-сімен (көрсеткіштері бар штрих сызықтармен белгіленген) және белсенді жағының қозғалыс бағытымен (ЭҚК, сондай-ақ ток, айнымалы көлем мәндері қалыптасқандай кіші әріппен белгіленеді) анықталады. Белсенді жағы магниттің N солтүстік полюстің аймағынан S оңтүстік полюстің аймағына ауысқан кезде, сол кезде ЭҚК бағыты қарсы бағытқа өзгереді (солтүстік полюстің ЭҚК бізге қарай бағытталған, ал оңтүстік полюс аймағында бізден кері бағытталған).

Орамның белсенді бір жағының ЭҚК лездік мән уақытынан тәуелді кестесі 1.2 *b*-суретте (жоғарыда) көрсетілген. Магниттің полюс ұштықтарының дұрыс пішінінде бұл тәуелділік синусоидалды болады:

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \sin 2\pi f t \quad (1.6)$$

мұндағы E_m — ЭҚК амплитудасы; ω — ЭҚК бұрыштық жиілігі, рад/с; f — ЭҚК жиілігі, Гц.

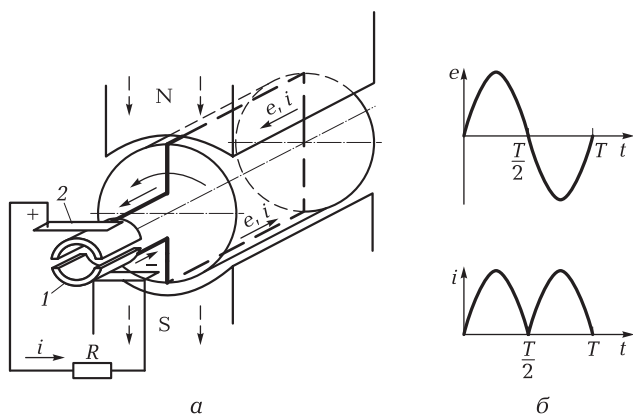
ЭҚК лездік мәні полюс ортасының белсенді орама жағымен өту кезінде амплитуда мәніне тең болады (осы сәті 1.2, *a* - суретте көрсетілген). Дәл айтқанда, өткізгіш жоғарғы (немесе төменгі) нүктеден өткен кезде, магнит өрісінің жолақтарын ең үлкен жиілікпен кесіп өтеді. Жиіктеме көлденең болған сәтте (қарастырылып жатқан конфигурацияда), ЭҚК нөлдік мәндерін, өріс жолақтар бойымен белсенді жағы қозғалыста болған жағдайда қабылдайды.

ЭҚК толық өзгерістерінің кезеңі зәкірдің бір айналымында орын алады, сондықтан ЭҚК жиілігі, егер айналу жиілігін секундтар айналымымен, ал ЭҚК жиілігін герцтармен, яғни секундына тербелістер саны өлшенсе, зәкірдің айналу жылдамдығына тең болады. Бірақ, айналдыру жылдамдығын *минутына айналыммен* өлшеу қажет және *n* әрпімен белгіленеді. Мұндағы

$$n \text{ [айналым/мин]} = 60/f \text{ [Гц]}. \quad (1.7)$$

тең болады.

ЭҚК (*T*, с) өзгеру кезеңі ЭҚК кері жиілігінің көлемі болады: $T = 1/f$. Өрнек (1.7) тек электр машинасында екі полюс болған жағдайда орынды болатынын айта кетейік.



1.2.-сурет. Тұрақты ток генератордың үлгісі:

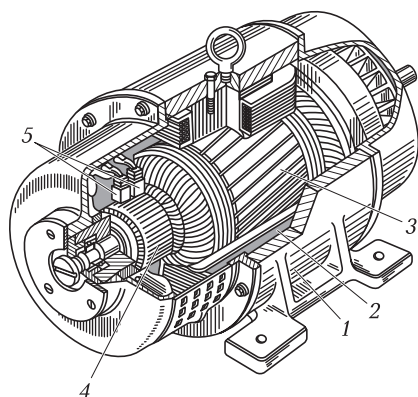
a — құрылғы: 1 — жарты сакина (коллекторлы тілімше); 2 — сырғымалы түйіспе (щетка); *б* — ораманың белсенді жағы мен ток қуатымен индукцияланатын, ЭҚК уақытына тәуелді кестелері.

Қарастырылып жатқан үлгіде зәкірмен білікте айналатын екі жарты сакинамен I , R кедергісімен электр энергия қабылдағышты қуат беретін *ток бағыты бойынша тұрақтыны* алу үшін, коллектор пайдаланылады. Қабылдағыштың тізбегі қозғалмайтын сырғымалы түйіспе — *щеткалар* 2 арқылы жарты сакиналармен қосылады. Жоғарғы (суреттегідей) щеткасы оң болады, өйткені ток сыртқы тізбектің бойымен ағып кетеді; Төменгі щетка теріс болып табылады: сыртқы тізбектің тогы оған ағады. Зәкірді айналдыру үдерісінде, әрбір щеткамен жарты сакиналар арқылы ораманың бір немесе басқа белсенді жағы түйіседі де, осылайша сыртқы тізбекте ток бағытының тұрақтылығы қамтамасыз етіледі, ал сол уақытта әрбір белсенді жағының тогы бағытты әр жарты кезең сайын өзгертеді.

Айналым жақтарында ЭҚК нөлге тең болған кезде, жарты сакиналар щеткамен қысқа тұйықталады.

1.2. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАНЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫ

Тұрақты ток машинасының негізгі бөліктері 1.3-суретте көрсетілген: статор 1 (машинаның қозғалмайтын бөлігі) құрамында машинаның магнит ағынын тұйықтайтын болат тұғыры бар, негізгі магнит ағынын жасайтын негізгі полюстер 2, сондай-ақ 1.3.-суретте көрсетілмеген қосымша полюстер бар. Бастапқы



1.3.-сурет. Тұрақты ток машинасы:

1 — статор; 2 — полюс; 3 — зәкір; 4 — коллектор; 5 — щетки бар щетка ұстағыштар

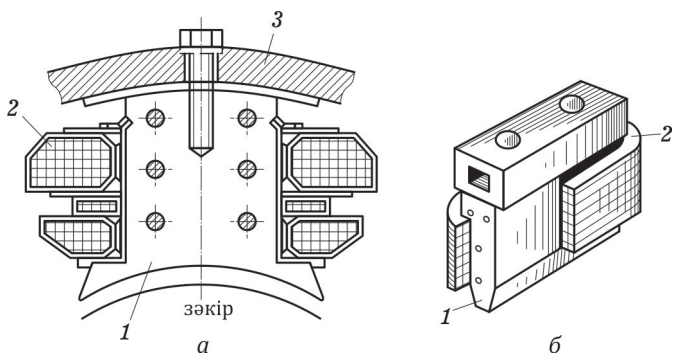
қозғалтқыштың білігінде айналатын зәкірде 3, механикалық энергия электр энергиясына айналады – бұл, генератор режимінде машинаның жұмысы.

Егер бастапқы қозғалтқыш болмаса, ал зәкірдің орамасы тұрақты кернеу көзіне қосылған болса, онда энергия басқа жолмен түрленеді, яғни машина қозғалтқыш режимінде жұмыс жасайды. Тұғырдың қалқандарында орнатылған білік мойынтіректерде бекітіледі. Коллектор 4, зәкір сияқты білікке орнатылады. Коллектор айнымалы тоқты, тұрақты токқа айналдыруға арналған. Коллектор тілімшелерімен сыртқы тізбектің электрлік қосылуы щетка ұстағыштар 5 орнатылған, жылжымайтын щеткалар көмегімен жүзеге асырылады.

Машинаның кейбір бөліктерін жеке қарастырайық.

Полюстер және зәкір. Негізгі және қосымша полюстер 1.4-суретте көрсетілген (қосымша полюстердің мақсаты төменде қарастырылатын болады).

Полюстердің 1 өзектері *дестелеген* болады: оларды, жоғары магнитті өткізгіштігімен сипатталатын электртехникалық болаттан жасалған тілімшелерден жинайды. Бір тілімшенің қалыңдығы 1...2 мм болады. Тілімшелер түйреуіштермен қысылған және өзара оксидтік пленкамен окшауланған. Өзектердің *дестелеген* құрылғысы ағылған құйынды токтарды едәуір бәсеңдетеді. Ауа саңылаулары полюстер мен зәкір арасында, полюстің ортасынан оның шетіне қарай ұлғаятындай етіп жасалынатын негізгі полюстердің біліктері, полюс ұштықтарымен аяқталады. Бұл, ауа саңыла-



1.4. – сурет Тұрақты ток машинаның полюстері:

a — негізгі полюс; *б* — қосымша полюс; *1* - полюс ұштарымен полюстің өзегі; *2* — полюсті шарғы; *3* — тұғыр

уында магниттік индукцияның қажетті таралуын қамтамасыз етеді. Ауа саңылауы 1,5 мм-ден аз болады.

Полюстік шарғылары мыс сымнан жасалған. Шарғыларды өзектерден оқшаулайды. Ұзындық бойымен бөліктерге бөлінген шарғы 1.4 *a*-суретте көрсетілген. Шарғыны және жұмыс барысында өзекті, едәуір салқындатуға мүмкіндік беретін шарғы бөліктерінің арасында желдеткіш арналар қалдырылады.

Негізгі полюстердің шарғы сымдар бойымен, магнит өрісінің қоздыру тогы ағып тұрады. Қоздыру токты жасау үшін, тұрақты ток машиналарын тәуелсіз қоздыру кезінде, кіші қуаттың бөлек тұрақты кернеу көзін қолданады. Генераторды өздігінен қоздыру кезінде, қоздыру тогы зәкір тогының бөлігі болады. Қозғалтқыш қоздырудың түрлі сұлбаларында, сол бір ғана қуат көзі зәкір орамасына да, қоздыру орамасына да қуат береді. Тұрақты ток машиналарды қоздыру сұлбалары 2 және 3 тарауларда қарастырылған.

Полюстер 3 тұғырға бұрандамен бекітіледі.

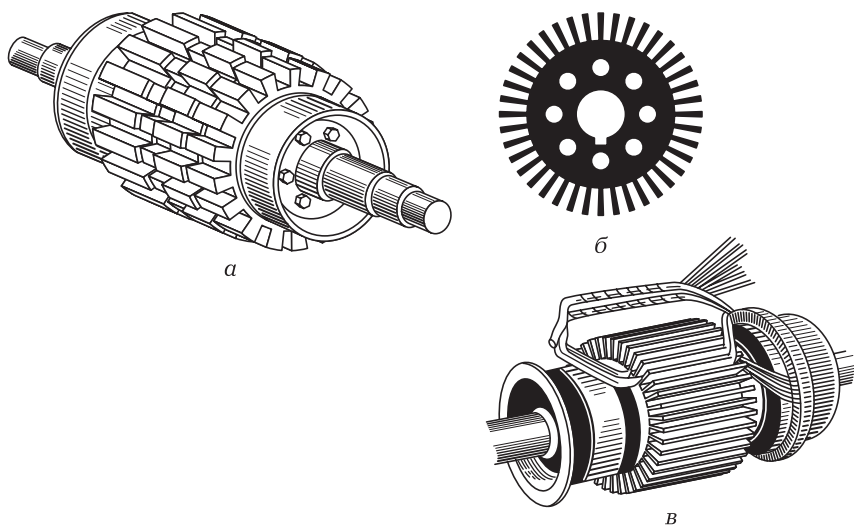
Тұрақты ток зәкірі 1.5-суретте көрсетілген. Зәкір өзегі (1.5, *a*-сурет) полюстер сияқты дестелегіш конструкциясы бар цилиндрді ұсынады: ол электртехникалық болаттың қалыңдығы 0,5 мм таңбаланған тілімшелерінен жасалған. Өзектің тақталары оқшаулағыш лакпен сырланған, тістері, ойықтары және желдеткіш тесіктері бар (1.5, *б* - сурет). Тақталар жинағы басқыш тығырықтармен қысылған. Келесі бөліктерде қарастырылатын, бір - бірімен белгілі бір сұлбалармен қосылған өзектің ойықтарында зәкірдің орамалары оралған (1.5-с сурет).

Зәкірдің орамасы ойықтардан оқшауланады және оларға сынамен (текстолит немесе гетинакстан) немесе бандажбен бекітіледі (сымнан немесе шыны баулардан).

Полюстердің өзектері мен зәкір жасалған электртехникалық болат – кіші қалдық магниттенген магниттік жұмсақ материалдан жасалған. Яғни, өзекке ауыстырылған орамаларда ток жүрмей қалған жағдайда, осындай материалдан жасалған өзектің магнит өрісі айтарлықтай бәсеңдейді.

Коллектор және щеткалар. Айнымалы тоқты бір бағыттағы токқа, сондай-ақ айналмалы зәкір мен қуат қабылдағыш тізбегінің қозғалмайтын бөлігі арасындағы электрлік жалғауды түрлендіретін машинаның әр маңызды торабын қарастырайық.

Екі жарты сакинадан тұратын (коллекторлық тілімшелер) қуат қабылдағыш тізбегі бойынша бір бағыттағы жүріп тұрған ток ағады. 1.2, а - суретте көрсетілген үлгіні күрделендірейік. Біріншіден, зәкірдің білігіне кеңістікте бір-біріне қатысты 90° жылжытылған бір емес екі өтетін орамаларды орналастырайық. Әрине, магнит өрісінде осындай зәкір айналған кезде ЭҚК екі орамдарда бір-біріне 90° фазалық бұрышқа жылжытылады (орамалардың біреуінде ЭҚК басқа орамдағы максимум ЭҚК кейін ширек уақыт өткен соң



1.5.-сурет. Тұрақты ток машиналардың зәкірі:

а — зәкірдің білігі; б — біліктің бөлек тілімшесі; в — орам бөлігін зәкірдің ойығында орналастыру

ең көп мәнін қабылдайды). Екеуден емес, төрт коллекторлы тілімшелерден құралған коллекторды жасаймыз. Ораманың бір ұшымен қосылған әрбір тілімше, енді жарты шенбер емес ширек шенбердің иінін ұсынатын болады. Жаңа үлгідегі щеткалар саны екіге тең етіп қалдырайық. Щеткаларды, ЭҚК ең көп мәні болатын сәтте ораманың тілімшелерімен түйісетіндей орналастырамыз. Зәкірді айналдырған кезде, щеткалар бір ораманың коллекторлық тілімшелерінен басқа ораманың коллекторлық тілімшелеріне өтеді; сонымен бірге уақыттың едәуір бөлігін әрбір щетка екі іргелес коллекторлық тілімшелермен түйіседі. Нәтижесінде, энергия қабылдағышынан ағып жатқан ток, екі коллекторлық тілімшесі бар үлгімен салыстырғанда айтарлықтай төмендейді. (Щетканың бір коллекторлық тілімшеден екіншісіне ауысу үдерісі 1.7 - бөлімінде қарастырылған).

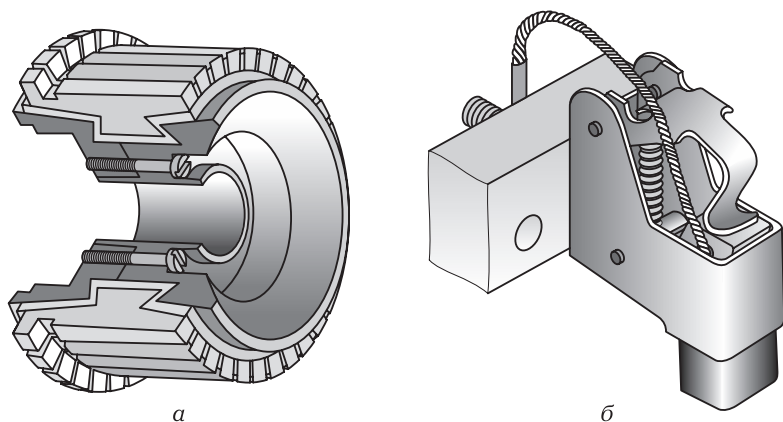
Коллекторлық тілімшелер санының келесі ұлғаюынан (және зәкір орамалар санынан) ток ағуы одан да төмендейді. Атап айтқанда, егер машинада бір магнит полюстері бар 16 тілімшеден (орамалар санын ұлғайтумен) тұратын коллекторды пайдаланса, токтың ағыны 1% төмендейді, яғни біз тек бағыт бойынша ғана емес және мәні бойынша тұрақты ток аламыз.

Коллектор (1.6, а-сурет) машина білігіне орналастырылған және біліктен оқшауландырылған. «Қарлығаштың құйрығы» пішінінде мыстан жасалған коллектор тілімшелері, коллектор құрылымының негізгі бөлшектері болады (ондай нысан монтаждауды және бекітпенің беріктігін қамтамасыз етеді). «П е т у ш к и» деп аталатын коллекторлық тілімшелердің дөңестеріне зәкірдің орамасы болатын сымдардың ұшын дәнекерлейді. Коллекторлық тілімшелерді бір-бірінен миканит төсемелермен оқшаулайды (миканит - слюда негізіндегі оқшаулағыш материал).

Сыртқы тізбекпен жылжымалы түйіспе жүргізілетін, көмір немесе графит щеткалары жанасып тұрады. Щеткалар щетка ұстағышына орнатылады (1.6, б - сурет). Серіппе мен қысатын тілімшеден тұратын механизм коллекторға қажетті щетканың қысымын қамтамасыз етеді және щетканың тозуын өтейді.

Қатар орналастырылған, бір полярлы үш щетка ұстағыштар (5) 1.3-суретте көрсетілген. Осы щетка ұстағыштар бір-бірімен машинаның қысқыштарына құрама шиналар арқылы қосылған.

Тұрақты ток машина конструкциясының негізгі ерекшеліктері екі полюсті машина мысалында қарастырылады. Ары қарай, зәкір орамаларының құрылысын талқылаған кезде біз ұсынылған ақпаратты



1.6.-сурет. Коллектор және щетка ұстағыш:
а —коллектор құрылғысы; *б* — щеткасы бар щетка ұстағыш

көп полярлы машиналарға таратуымыз қажет.

1.3. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНА ЗӘКІРІНІҢ ОРАМАЛАРЫ ТУРАЛЫ ЖАЛПЫ МӘЛІМЕТТЕР

Зәкір о р а м а с ы зәкірдің ойықтарына және бір-бірімен белгілі сұлба бойынша орнатылған өткізшердің тұйықталған жүйесін ұсынады. Орама бөліктерден тұрады.

Ораманың б ө л і г і — бұл бір немесе бірнеше жүйелі қосылған орамалар (соңғы жағдайда бөлім шарғыны ұсынады). 1.2, *а* - суретте көрсетілген үлгіде зәкірдің орамасы тек бір бөліктен тұрады, ал бөліктің бір ғана орамасы бар. Бөліктің басы мен соңы екі әртүрлі коллекторлық тілімшелерге қосылады. Бөліктерге арнайы нысан беру үшін, олар арнайы үлгі бойынша жасалады.

ЭҚК салынған бөліктердің *белсенді жақтары* деп аталады. Ойықтардың шетінен шығып тұратын және белсенді жақтарын қосатын бөліктері *алдыңғы бөліктер* (алдыңғы қосылулар) деп аталады. Белсенді жақтары мен бөліктердің алдыңғы қосылулары 1.5, *в*-суретте анық көрінеді.

Бөліктің белсенді жақтары үнемі статордың әр аттас полюстерінде орналасқан. Егер машинаның негізгі полюстер саны екіге тең болса (яғни, *полюстер жұптарының саны p* бірлікке тең болса), онда бөліктердің белсенді жақтары зәкір ойықтарының диаметрлі

карама қарсы бөліктерінде орналасады (1.2, а және 1.3 суреттерінде дәл сондай жағдайлар көрсетілген). Егер полюстер саны төртке тең болса (яғни, полюстердің жұп саны p екіге тең болса), онда белсенді жақтар 90° арқылы орналастырылады, өйткені дәл сол бұрышқа бір кереғарлық полюс басқа кереғарлық полюсқа біршама жылжытылған (машинаның негізгі полюстары үнемі алмасады: N, S, N, S және т.б.).

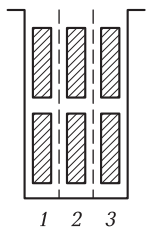
Полюстік бөлу τ негізгі іргелес полюстер орталарының арасындағы қашықтық, осы қашықтық зәкір өзегінің бетінде өлшенеді. Егер D — зәкір өзегінің диаметрі болса, онда зәкір шеңберінің ұзындығы πD құрайды. Егер полюстер саны $2p$ тең болса, онда полюстік бөлу болады:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \quad (1.8)$$

Зәкір орамалары *екі қабатты* етіп жасалады, яғни әр ойықтарға екі әртүрлі бөліктердің екі белсенді жақтарын орналастырады: бір бөліктің бастапқы (*тақ*) жағын және басқа бөліктің соңғы (*жұп*) жағын. Бұл ретте, тақ жағы ойықтың үстіңгі қабатында орналасады. Бөліктердің белсенді жақтарын орналастырғаннан кейін, ойықтың жоғарғы жағын магниттік емес сынамен қатырады.

Тек екі белсенді жақтары бар ойықтар *қарапайым* деп аталады. Машина зәкірінің нақты ойығында бөліктердің белсенді жақтарының көптеген саны болу мүмкін. Ондай ойық бірнеше қарапайым ойықтардан тұрады (1.7-сурет).

Зәкір орамасының бөлігінде екі белсенді жақтары болғандықтан, әрбір қарапайым ойықта екі белсенді жақтары орналастырылған (бірақ, әртүрлі бөліктерге қатысты), Z_p қарапайым ойықтар саны Z_c орамалардың бөліктер санымен тең келеді. Әрбір коллекторлы тілімшемен бөліктің бір басы мен соңы қосылған, сондықтан Z_k коллекторлы тілімшелер саны сондай бөліктер санына тең болады.



1.7 - сурет. Нақты ойықты қарапайым ойықтарға бөлу (1, 2, 3)

Егер бөлім бір орамнан тұратын болса, орамалардың белсенді сымдар саны бөліктердің белсенді жақтарының санына тең болады. Бұл сан бөліктер санынан екі есе үлкен екені анық. Егер бөліктің w орамдары болса, онда N белсенді сымдар саны w есе көп болады.

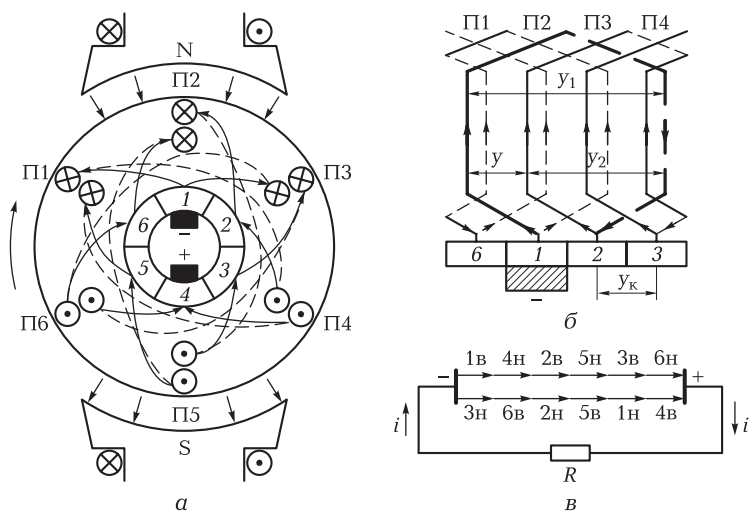
Айтылғандарды тізбектер теңдігімен біріктірейік

$$Z_3 = Z_c = Z_k = \frac{N}{2w}. \quad (1.9)$$

1.4. ІЛМЕКТІ ОРАМАЛАР

Зәкірдің қарапайым ілмекті орамалары. Қарапайым ілмекті (параллельді) ораманың әрбір бөлік ұштары іргелес коллектор тілімшелерге қосылуымен сипатталады.

Қарапайым ілмекті ораманың құрылымын, екі полюсі және алты коллекторлы тілімшелері ($Z_k = Z_c = 6$) бар тұрақты ток генератор ($p=1$) мысалында қарастырайық. Полюстермен жасалған магнитті өрістің индукция сызықтарының бағыты 1.8, a - суретте көрсетілген (бұл бағыт, оң бұрандалы кол бұрғы ережесі бойынша полюстер ораманың ток бағытын есептеумен табылған); сонымен қатар зәкірдің айналу бағыты көрсетілген (айналу үдерісі алғашқы қозғалтқышпен



1.8.-сурет. Қарапайым ілмекті орама:

a — орама сұлбасы; b — ашып көрсетілген сұлба үзіндісі; $в$ — қуат қабылдағышына қосылған зәкір ораманың негізгі сұлбасы

жасалады). Оң қол ережесі бойынша, зәкір ораманың белсенді жақтарына бағытталған, ЭҚК бағыты анықталды. Егер генератор қуат қабылдағышқа қосылған болса, осы бағыттар токтар бағытына сәйкес келеді. Белсенді жақтары ойықтарда жұпталып орналастырылған. Алдыңғы қосылыстар көрсеткіштері бар сызықтармен, ал артқылары штрих сызықтармен көрсетілген. Көрсеткіштері бар сызықтар алдыңғы қосылыстарда, белсенді жақтар бағыттарына сәйкес, токтар бағытын көрсетеді. Щеткалардың көрсетілген өрістері де (олар ынғайлы көрсетілу үшін, коллектор тілімшелерінің астында суреттелген) токтар бағыттарына сәйкес болады. Шын мәнінде, жоғарғы щетканың теріс өрісі бар, өйткені 1.8-суретте көрсетілмеген сыртқы тізбектен ток осы щетка бағыты бойынша ағады.

Коллекторлы тілімшеден 1, ток бағытымен қозғалып, теріс өрісте щеткамен жанасып жатқан ораманың жеке бөлігінің құрылысын бақылайық. Бөліктің алдыңғы маңдайлы бөлігі коллекторлық тілімшені 1 ойықтың П1 жоғарғы бетінде жинақталған белсенді жағымен қосады. Осы бөліктің артқы маңдайлы бөлігі, П4 ойығының төменгі қабатында орнатылған екінші белсенді жағына, осы белсенді жағының артқы шет жағынан келеді. Екінші белсенді жағының алдыңғы шет жағы коллекторлы тілімшенің 2 алдыңғы бөлігімен қосылады. Сонымен, бөлік іргелес коллекторлы тілімшелерде басталып, аяқталады, ал оның белсенді жақтары диаметрлі қарсы ойықтарда, яғни кері өрістердің полюстер астында орнатылған. (Жалпы, егер машинаның p жұп полюстері болса, бір бөліктің белсенді жақтары орнатылған ойықтар арасындағы орталық бұрыш $180/p$ тең болады).

Ілмекті ораманың ашып көрсетілген сұлба үзіндісінде (1.8, б - сур.) қарастырылған бөлігі қалың сызықпен көрсетіледі. Ойықтардың жоғарғы қабатында орнатылған белсенді жақтары, ашық сұлбада тұтас сызықтармен, ал төменгі қабатта орнатылған белсенді жақтары штрих сызықтармен көрсетілген.

Осы суретте белгіленген:

- зәкірдің орамасы y_1 бойынша, бірінші жартылай қадамы - қарапайым ойықтардың санымен өлшенетін сол бөліктің белсенді жақтары арасындағы қашықтық;
- екінші жартылай қадам y_2 - осы бөліктің соңғы белсенді жағы мен келесі бөлігінің бастапқы белсенді жағы арасындағы қашықтық;
- нәтижелі қадам y - бір-бірінен кейін орнатылған бастапқы тараптар арасындағы қашықтық;

- коллектор бойынша қадам y_k – бұл бөліктің басы мен соңы қосылған коллекторлық тілімшелер орталарының арасындағы қашықтық; бұл қадам коллекторлы бөлулерде өлшенеді.
- коллектор бойынша қадам - осы секцияның басы мен соңы қосылған коллекторлық тілімше орталықтарының арасындағы қашықтық; бұл қадам коллекторлық бөлімдерде өлшенеді.

Ілмекті орама үшін:

$$y = y_1 - y_2; y_k = y \quad (1.10)$$

Осыдан алдын, 1 коллекторлық тілімшеден 2 коллекторлы тілімшеге дейін ток бағытымен өтіп, бір бөліктің бөліктерін орнату қарастырылған еді. Зәкір орамасының барлық өткізгіштерді қосу сұлбасын табу үшін, сұлбаны айналып өтуді жалғастырамыз (1.8, a - суретті қараңыз). Коллекторлық тілімшеде 2 қарастырылған бөлікпен қосылған келесі бөлік басталады. Тілімшеден 2 ойықтың П2 жоғарғы қабатына келеміз, одан П5 ойықтың төменгі қабатына келеміз. Әрі қарай жүйелі қосылған алдыңғы және белсенді бөліктер бойымен қозғала отырып, төменгі щеткамен түйісетін Р6 ойықтың төменгі қабатынан 4 коллекторлық тілімшеге жеткенше токтың бағыты өзгермейді. Осы нүктеде электр тізбегінің торабы бар, өйткені оның үш сымы біріктіріледі: олардың екеуі екі бөліктің алдыңғы қосылымдарына жатады, ал үшіншісі щеткадан сыртқы тізбекке өтеді (1.8 a - суретте, бұл сым көрсетілмеген).

Әрі қарай коллекторлық тілімшеден 4 бөліктердің кейінгі айналып өтуі ток ағымына қарсы жүретін болады. Алдымен біз Р4 ойықтың үстіңгі қабатына, одан кейін Р1 ойықтың төменгі қабатына және т.б. келеміз. Ойықтың Р3 төменгі қабатының коллекторлы тілімшемен қосылып айналып өтуі, ораманы қарастырып бастаған жерден аяқталады 1. Бұл коллекторлы тілімше 4 тілімше сияқты щеткамен түйіседі және торап болып табылады.

Коллекторлық тілімшемен 1 қосылатын ораманың екі сымында тілімшеден ток ағып, коллекторлық тілімшемен 4 қосылатын екі сымдарда ток тілімшеге қарай ағып жатқанын көреміз. Барлық қалған тілімшелерге келетін болсақ, олардың әрқайсысы кіретін және шығатын ток қосу нүктесі болып табылады.

Қарапайым ілмекті орама сұлбасын қарастыру нәтижесінде біз екі тораптың және екі параллель тармақтың бар екенін анықтадық ($2a = 2$, мұнда a - параллель тармақтардың жұп саны), әр тармақ бір-

дей белсенді жақтарды қамтиды. Ораманың негізгі сұлбасы 1.8, в - суретте көрсетілген, осында ойықтардың санына сәйкес бөліктердің белсенді жақтары белгіленген; «в» әрпі ойықтың үстіңгі қабатына белсенді жағының, ал «н» әрпі төменгі жағының орналасуын көрсетеді. ЭҚК лездік мәні е генератордың қарастырылып жатқан сәтінде, бір параллельді тармақтың белсенді жақтарында индукцияланған ЭҚК сомасына тең болады:

$$e = e_{1в} + e_{4н} + e_{2в} + e_{5н} + e_{3в} + e_{6н} = e_{3н} + e_{6в} + e_{2н} + e_{5в} + e_{1н} + e_{4в}. \quad (1.11)$$

Зәкірді 60° бұрған сәтте, коллекторлық тілімше 6 жоғарғы позицияда орналасады және жоғарғы щеткамен түйіседі, ал коллекторлық тілімше 3 төменгі орынды алады және төменгі щеткамен түйіседі. Осы сәттегі ораманың негізгі сұлбасы 1.8 в-суретінен тек ойықтар санынан өзгеше болады. Дәл сол теңдеудегі өзгерістерге де қатысты болады (1.11).

Аралық уақытта, атап айтқанда, бастама негізінен зәкірді 30° бұрған кезде жоғарғы щетка 6 және 1 коллекторлық тілімшелерді, ал төменгісі 3 және 4 коллекторлық тілімшелерді қысқа тұйықтайды. Бөліктің белсенді жақтары Р6 ойығында (жоғарғы қабаты) және Р3 ойығында (төменгі қабаты) жататын 6 тілімшеде басталады және 3 тілімшеде аяқталады.

Бөліктің белсенді жақтары Р3 ойығында (жоғарғы қабаты) және Р6 ойығында (төменгі қабаты) жататын 3 тілімшеде басталады және 4 тілімшеде аяқталады. Көрсетілген бөліктер щеткалармен тұйықталады. 1.8, а - суретте көрсетілгендей зәкірді көрсеткіш сызықтар бағытына қарай 30° бұрса, Р3 және Р6 ойықтары *геометриялық бей-тараптамада* орналасады, яғни тураланған ЭҚК нөлге тең (мінсіз жағдайда) болатын полюстердің осіне перпендикуляр жазықтықта орналасады (егер $p = 1$). Осылайша, қарастырып жатқан сәтте ЭҚК қысқа тұйықталу бөліктерінде тураланбайды және теңдеудегі (1.11) сомалардың әрқайсысы екі қосылғышқа азаяды. Осының салдарынан генератор қысымында кернеудің лүпілі пайда болады, бірақ әрбір параллель тармақта бөліктер саны көп болған сайын лүпіл азаяды.

Ораманың параллель тармақтарының саны арта бастағанда, *зәкірдің номиналды тогы* ұлғаяды, өйткені сыртқы тізбекте ағатын, көп санды тармақтарда зәкірдің тогы машинаның ішіндегі көп ток ағымдарына бөлінеді. (Осы машинаға немесе осы құрылғыға есептелген мөлшерлеме номиналды деп аталады.) Қарапайым ілмекті

1.9.-сурет. Төрт полюсті тұрақты ток машинасының сұлбасы



ораманың параллель тармақтарының санын машинаның негізгі полюстер санын көбейту арқылы көбейтілуі мүмкін, себебі тармақтар саны негізгі полюстер санына тең: $2a = 2p$.

Көп полярлы машина. 1.9 – суретте төрт полярлы машинаның сызбасы көрсетілген. Оның полюстер жүйесін екі полюсті машинаның бір зәкірдің қасындағы екі жүйесі ретінде ұсыну мүмкін. Сонымен бірге, әр жұптың солтүстік және оңтүстік арасындағы орталық бұрыш 180° емес, 90° болады. Екі полюсті машинада зәкірдің бір айналым арасында пайда болған үдерістер, төрт полюстағы машинада жарты айналымда орын алады. Егер екі полярлы генератордың әрбір бөлігінде ЭҚК өзгеру кезеңі зәкірдің бір айналу кезеңінде орын алса, онда төрт полюсті бөлігінде жарты айналу кезеңінде болады.

Полюстер санына пропорционалды орнатылған щеткалар саны көбейеді, төрт полюсті машинада екі емес, төрт щетка (немесе төрт щеткалар қатары) бар. Әрбір щетка, тұйықтайтын бөлікте геометриялық бейтараптама аймағында тұйықталған кезде, қозғалатындай етіп орнатылады. Бір белгісі бар щеткалар бір-біріне электрлік түрде жалғанады және машинаның сәйкес қысқышына қосылады.

Айтылғанды $2p$ полюстердің туынды санына дейін тарату мүмкін.

Зәкірдің күрделі ілмекті орамасы. Полюстер санын көбейтпестен тармақтардың көп санына жету үшін, күрделі ілмекті орамасы (параллель) жасалады. Бұл қарапайым ілмектер орамаларының бірнеше ($m = 2, 3, 4, \dots$) жиынтығын ұсынады. Осындай машиналардағы щеткалардың ені m коллекторлық бөліктерден кем болмауы керек, осылайша m қарапайым орамалар щеткалар арқылы параллель қо-

сылады. Демек, күрделі ілмекті ораманың параллель буындарының саны $2a = 2pt$ болып табылады. Осы түрдегі орамалар зәкірдің үлкен тогы бар төменгі кернеу машиналарында қолданылады, мысалы, электролиз үшін генераторларда.

Орамалар симметриясы мен теңгермелік жалғаулар. Зәкір орамасының барлық параллель тармақтарында келтірілген ЭҚК бір-біріне тең болу керек, кері жағдайда, сыртқы жүктеме болмаған кезде (бос жүру режимінде) ораманың ішінде *теңгермелі ток* ағады. (Сонымен қатар, әртүрлі ЭҚК бар, екі тұрақты кернеу көздерінің параллельді қосылу кезінде орын алады). Теңгермелі ток ағуының нәтижесінде, зәкірдің орамасы қызады және щеткалар астындағы ток тығыздығы ұлғаяды, соның нәтижесінде коллектор ұшқындайды.

ЭҚК параллель тармақтарының теңдігін қамтамасыз ету үшін, *зәкір ораманың симметриялық жағдайын сақтау* қажет:

- барлық ойықтардағы өткізгіштердің саны бірдей болу керек;
- параллель тармақтардың жұптары жиналған ойықтардың саны бірдей болуы тиіс;
- параллель тармақтардың әр жұптың бөліктер саны бірдей болуы тиіс;
- параллель тармақтардың әрбір жұбы негізгі полюстер жүйесіне қатысты бірдей орын алу тиіс, яғни бірдей магниттік жағдайда болу керек.

Дегенмен, ілмекті орамалардың теңестіруші токтарында симметрия шарттары орындалса да пайда болады. Бұл машинаның магниттік жүйесінің асимметриясына байланысты. Асимметрияның себебі - бұл машинаны жасау кезінде пайда болатын ақаулар (әртүрлі полюстерде саңылаулардың теңсіздігі, зәкір ортасының дұрыс емес болуы, тұғырды құйғанда қуыстардың пайда болуы). Теңгермелі токтар, жүктеме токпен қосылып параллель тармақтардың біркелкі емес жүктемесін жасайды. Теңгермелі токтар ораманың бір параллель тармағынан екіншісіне щеткалар арқылы өтеді. Теңгермелі токтар щеткалар арқылы тұйықталмау үшін, *теориялық жағынан потенциалы* бар ораманың электр нүктелердің электр қосылымы қолданылады. Осы нүктелер коллектор жағында немесе коллекторға қарама-қарсы орналасқан ораманың алдыңғы бөліктерінде таңдалады. Аталған қосылыстарды бірінші түрдегі *теңгермелік жалғаулар (теңестірушілер)* деп атайды. Бірінші түрдегі теңестірушілер

арқылы тұйықталатын токтар машинаның магниттік жүйенің асимметриясын төмендетуге тырысатын орамада магниттік ағынды қалыптастырады. Теңгермелік жалғаулардың максималды саны Z_k/p болады, яғни бір жұп полюстер санына келетін коллекторлық тілімшелердің санына тең болады. Теңестірушілердің максималды саны тек қуатты машиналарда қолданылады; басқа жағдайларда әрбір нақты ойыққа бір немесе екі теңгермелік жалғаулар қолданылады.

Күрделі орамаларда, магниттік жүйенің асимметриясын теңестіруге арналған бірінші түрдегі теңгермелік жалғаулардан басқа, екінші түрдегі теңгермелік жалғаулар қолданылады, бұл қажеттілік щетка мен жеке коллектор тілімшелер арасындағы өтпелі кедергілердің теңсіздігінен туындайды.

Күрделі ораманың бөлігіне қосылатын қарапайым орамалар, бір-біріне щеткалар арқылы параллельді қосылады. Айтылған өтпелі кедергілердің теңсіздігінен қарапайым орамалар арасындағы ток жүктемесі бір қалыпты емес таратылады, бұл іргелес коллектор тілімшелер арасында кернеуді бір қалыпты емес таратады және щеткалардың ұшқындауын тудырады. Екінші түрдегі теңгермелік жалғаулар, күрделі ораманы құраушы қарапайым орамалар арасында тоқты таратудың теңдігін қамтамасыз етеді. Осы қосылулар бір - бірімен әртүрлі қарапайым орамаларға қатысты және теория жағынан бірдей потенциалы бар нүктелерді қосады.

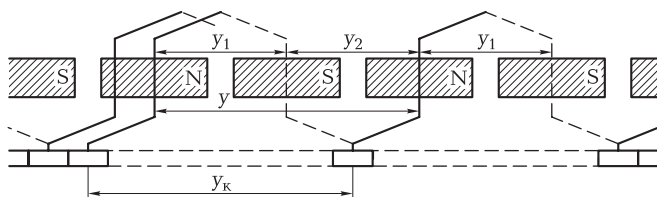
1.5. ТОЛҚЫНДЫ ОРАМАЛАР ЖӘНЕ АРАЛАС ТҮРДЕГІ ОРАМА

Қарапайым толқынды орама. Қарапайым толқынды (жүйелі) орамада, бастауы бір аттас полюстермен бірінен кейін бірі басталатын бөліктер жүйелі түрде қосылады (1.10-сурет). Орама аралығы теңдеулерге байланысты:

$$y = y_1 + y_2; y_k = y \quad (1.12)$$

(Ілмекті орама үшін (1.10) теңдеулермен салыстырыңыз).

Қарапайым ілмекті орамада әр бөліктің басы мен соңы іргелес коллекторлық тілімшелермен қосылады, қарапайым толқынды орамада әр бөліктің бастапқы және соңғы коллекторлық тілімшесі арасында қашықтық болады. Қарапайым ілмекті ораманың әр бөліктің басы мен соңы іргелес коллекторлық тілімшелерге қосылған кезде, қарапайым толқынды орамада бастапқы және соңғы коллекторлық тілімшелердің әр бөлігінде қашықтық болады,



1.10.-сурет. Қарапайым толқынды ораманы жасау сұлбасы (зәкір бойымен бір айналым мен екінші айналымның басталуы көрсетілген)

$$y_k = \frac{Z_k - 1}{p}, \quad (1.13)$$

мұндағы Z_k — машинаның коллекторлық тілімшелер саны (1.3-бөлімді қараңыз).

Егер қарапайым ілмекті орамада зәкірдің бір айналымында барлық бөліктердің бір-бірімен байланыстарын бақыласақ, қарапайым толқынды ораманың бір айналымында бір-бірімен қосылған бөліктер саны машинаның p полюстер жұптарының санына тең болады.

Қарапайым толқынды зәкір бойынша, бір айналым жасап, біз айналым басталған (бастапқы тілімшенің сол жағынан 1.10-суретті қараңыз) тілімшеге іргелес орналасқан коллекторлы тілімшеге келеміз. Сонымен, айналып өткен соң бастапқы тілімшеге бір коллекторлы бөлікке дейінгі қашықтыққа жетпейміз, демек, формулада 1-саны (1.13) пайда болды.

Содан кейін, екінші рет айналып келіп, тағы бір коллекторлық тілімшеден сол жағына қарай тоқтаймыз. Барлық кейінгі орамдарды өтіп біз барлық коллекторлық тілімшелердің қосылыстарынан айналып өтеміз. Соңғы айналымды аяқтаған тілімше, формула (1.13) бойынша анықталған қашықтықта бастапқы тілімшеден сол жаққа қарай жылжиды. Осыдан кейін соңғы қадам жасалады: тағы бір бөлік бастапқы коллекторлы тілімшемен соңғы айналымның ұшын жалғайды.

Біз, *ораманың қиылыспайтын* немесе *сол жақ жүру сұлбасын* қарастырдық. Егер зәкір бойынша, бір айналымды аяқтағаннан кейін біз бастапқыдан оң жағына қарай орналасқан коллекторлы тілімшеге келгенде, онда *орама қиылысатын* немесе *оң жақ* жүрісті болар еді. Осындай ораманың коллекторы бойынша, қадам минуспен плюспен ауыстыру арқылы алынатын формуламен беріледі (1.13). Қиылыспайтын орамаға қарағанда, қиылысатын орама сымның көп шығының талап етеді және іс жүзінде аса қолданылмайды.

Қарапайым толқынды орамаға тән ерекшеліктер, оның параллель тармақтарының саны, машинаның полюстер санына қарамастан, әрқашан екіге тең болады: $2a = 2$. Бір параллель тармаққа барлық бөліктер енгізілген, олардың басы полюс бөліктерінің бір өрісінде, ал екіншісі - басқа өрістің полюстік бөліктерінде орналасқан. Осындай орамасы бар машинада бір полюстік бөлімге бір-бірінен бөлінген екі щетканы ғана қолдануға болады. Дегенмен, бұл жағдайда ораманың симметриясы бұзылады: әр параллель тармақта әртүрлі бөліктер саны бар. Егер орнатылатын щеткалар саны машинаның полюстер санына тең болса, бұл ақау жойылады. Өрістері бірдей щеткалар бір-бірімен біріктіріледі.

Қарапайым толқынды орамада *теңгермелік жалғаулар* талап етілмейді, өйткені осы ораманың әр параллель тармағының бөліктері барлық полюстерде орналасады және жеке магниттік ағындардың теңсіздігі параллель тармақтардың ЭҚК-на бірдей әсер етеді.

Күрделі толқынды орама. Зәкірдің күрделі толқынды орамасы бір коллекторға қосылған қарапайым m толқынды орамалардан тұрады. Зәкірдің жалғыз айналымы, бастапқымен іргелес тұрған коллектор тілімшелерінде емес, бастапқыдан $y_k = m$ қашықтықта орналасқан тілімшеде аяқталады. Күрделі толқынды орамасы сияқты, осындай орамада, щетканың ені m коллекторлы бөліктерден кем болмайды және қарапайым орамалардың параллель қосылуын қамтамасыз етеді. Сондықтан күрделі толқынды ораманың параллель тармақтарының саны $2a = 2m$ құрайды, осындай орама параллельді тармақтар санын көбейту үшін қолданылады, өйткені қарапайым орамамен салыстырғанда, орама сымның қимасын ұлғайтпай зәкірдің үлкен ток ағымын қамтамасыз етеді.

Күрделі толқынды орамаларда, сондай-ақ күрделі ілмекті орамаларда *екінші түрдегі теңгермелік жалғаулар* қолданылады және олардың қажеттілігі күрделі ілмекті орамалар себебімен ескерілген.

Орама түрін таңдау. Ораманың түрін таңдау (ілмекті немесе толқынды, күрделі немесе қарапайым) негізінен зәкірдің номиналды ток және машина қысқыштарының номиналды кернеу мәндерімен анықталады. Қызметіне қарай тұрақты ток машинасы бірдей қуатта зәкірдің тұрақты ток мәнімен, төмен кернеумен сипатталады, немесе керісінше.

Тұрақты ток машинаның номиналды кернеу мәні келесі дәрежелерге бөлінеді:

- төмен кернеу машиналары ($24 U_{\text{ном}}$ дейін номиналмен);
- төмен кернеу ($60...80 U_{\text{ном}}$ арасындағы номиналмен);

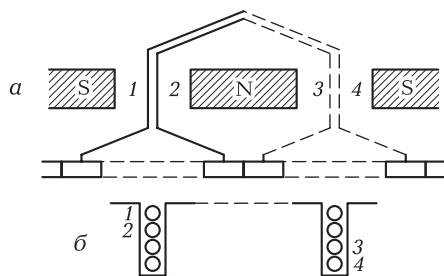
- қалыпты кернеу ($110...220 U_{\text{ном}}$ арасындағы номиналмен);
- жоғары кернеу ($440...600 U_{\text{ном}}$ арасындағы номиналмен);
- ең жоғары кернеу ($750 U_{\text{ном}}$ - нан жоғары).

Зәкірдің номиналды тогы машинаның номиналды қуаты бойынша анықталады. Тұрақты ток машиналарының номиналды қуаттарының келесі жуықталған жіктелуі қабылданды: кіші қуат - 50 кВт дейін; орташа - 50-ден 500 кВт-қа дейін; жоғарғы - 500 кВт-тан астам.

Кернеудің жоғары мәндерінде, толқынды (жүйелі) орама қолданылады, оның электр қоздырушы күші белсенді ЭҚК жақтарының көп санынан тұрады; жоғары ток мәндерінде - ілмекті (параллельді), параллель тармақтарының токтар сомалары зәкір тогын береді. Егер, қарапайым ілмекті немесе қарапайым толқынды орама қажетті қуатты алуды қанағаттандырмаса, онда күрделі ілмекті, күрделі толқынды ораманы немесе аралас түрдегі ораманы пайдаланады, оның ерекшеліктерін төменде талқылаймыз.

Аралас түрдегі орама. Жоғары қуаттағы машиналарда аралас түрдегі орама жиі қолданылады (аралас, бақа тәріздес), ол қарапайым ілмекті және күрделі толқынды орамалардың үйлесімі болып табылады. Мұндай орамалар зәкірдің төрт қабатында орналасады және жалпы коллекторға қосылады. 1.11-суретте осындай ораманың бір бөлігін және оның белсенді жағын зәкірдің ойықтарына орналастыруы көрсетілген. Екі жоғарғы ойықтардың қабаттарында бөліктердің жақтары 1.11 а - суретте тұтас сызықтармен, ал штрих сызықтармен басқа ойықтың төменгі екі қабатында орналасқан жақтары көрсетілген. Аралас түрдегі ораманы жасаған кезде, әр коллекторлы тілімшеге әртүрлі бөліктерге жататын төрт өткізгіш дәнекерленеді.

Зәкірдің тогы орамалар арасында біркелкі бөліну керек, сондықтан *аралас ораманы құрайтын толқынды және ілмекті ора-*



1.11.-сурет. Аралас түрдегі ораманың бөлімі: а - әзірленген сұлба; б - белсенді жақтарын ойықтарға орналастыру

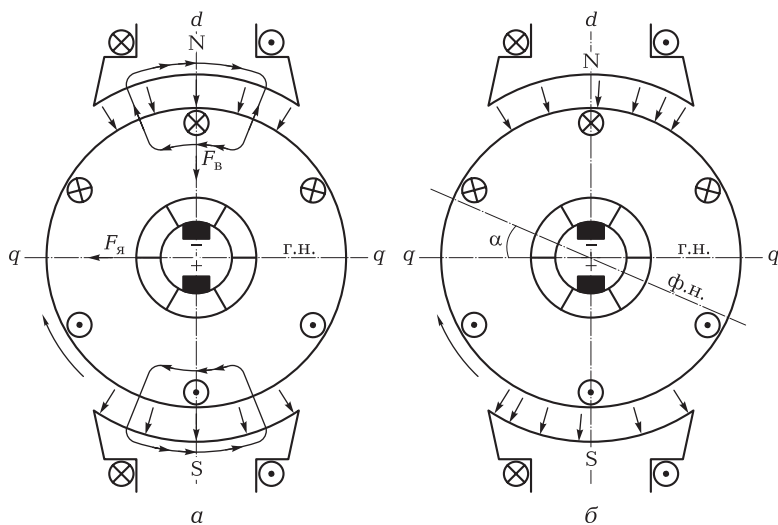
малардың параллель тармақтары бірдей болу қажет. Бұрын айтылғандай, қарапайым ілмекті орамада параллель $2a$ тармақтардың саны $2p$ полюстерінің санына тең; қарапайым толқынды орамада тармақтар саны екіге тең; күрделі толқындық орамда $2m$, мұндағы m - күрделі ораманы құрайтын қарапайым толқынды орамалар саны. Осыған орай, қарапайым ілмекті орама мен күрделі толқынды орама аралас түрдегі орамаға енгізілу керек, мұндағы $m = p$ (аралас түрдегі ораманы күрделі ілмекті орама құрамында қолдану ақталмайды).

Теңгермелік жалғаулар қажеттілігінің жоқтығы қарастырылған ораманың маңызды артықшылығы болып табылады: толқынды орама ілмекті орамаға арналған бірінші түрдегі теңгермелік жалғаулар рөлін атқарады, ал ілмекті орама толқынды орамалар үшін екінші түрдегі теңгермелік жалғаулардың рөлін атқарады.

1.6. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАНЫҢ ЗӘКІР РЕАКЦИЯСЫ

Зәкір реакциясы - бұл зәкір тогымен құрылатын магниттік өрістің реакциясы.

Генератордағы зәкір тогының реакциясы. 1.12 а-суретте



1.12.-сурет. Тұрақты ток генераторының магнит өрісінің қарапайым бейнесі:

а - негізгі полюстердің өрісі және зәкір өрісі; *б* - нәтижелік өріс

тұрақты ток генераторының негізгі полюстерінің магниттік өрісі (тек ауа ағынның шегінде) және зәкір ораманың өткізгіштерінде ағып жатқан индукциялық токтың магнит өрісі (тек полюстік ұштардың ортасында орналасқан белсенді тараптар үшін) жеңілдетіледі. Бұл өрістердің күш бағыттары бұрғылау ережесімен анықталады.

Егер сыртқы жүктеме генератор қысқыштарына қосылмаған болса, онда зәкір орамада (*бос жүріс режимінде*) ток өтпейді, ал магниттік өріс тек негізгі полюстердің өрісі болып табылады.

Жүктелген генератордың зәкір сымдарында өз магнит өрісін жасайтын ток пайда болады. 1.12 а - суретте солтүстік магниттік полюстің сол жақ полюстік ұштығында, полюстік жолдың сызығына қарама-қарсы зәкір өрісінің сызықтары бағытталғаны көрінеді. Сондықтан, осы аймақта зәкір өрісі полюстік өрісті әлсіретеді. Оңтүстік полюстің полюс ұштығының оң жағындағы ауа ағыны үшін де дәл осылай болады. Полюстер мен зәкірлердің салыстырмалы қозғалысын ескере отырып, полюстің шоғырланған шеті зәкірдің магниттік ағынымен магнитсіздендіріледі деп айтады.

Солтүстік полюстің оң жақ полюс ұштығында полюстік жолдың сызықтарына полюстік жолдың сызығына қарама-қарсы зәкір өрісінің сызықтары бағытталған. Осылайша, осы аймақта зәкір өрісінің полюстер өрісін нығайтады. Оңтүстік полюстің полюс ұштығының сол жағындағы ауа ағыны үшін де дәл осылай болады. Сонымен, *полюстің шоғырланған шеті зәкірдің магниттік ағынымен магниттендіріледі*.

1.12, б – суретте генератордың ауа ағынындағы нәтижелік өріс ықшамдалып көрсетілген (полюстер өрісін және зәкір өрісін қосудың нәтижесі). Нәтижелік өрістің индукция жолдарының жиілігі магниттік B индукцияның шамасын анықтайды: полюстің шоғырланған шетіндегі өріс әлсірейді және төмендеген кезінде күшейтіледі.

Болаттың қанықтылығына байланысты, зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекеті магниттеуге қарағанда көп болады, сондықтан *зәкір реакциясы машинаның магниттік ағынның төмендеуіне әкеледі*. Физика және электротехника курстарынан еске түсірейік, ферромагниттік материалдың қаныққан қасиеті ферромагниттің ішіндегі магниттік индукция күшейе отырып, сыртқы магнит өрісінің өсуімен, бара бара баяу өседі. Барлық домендер (өздігінен магниттелген аймақтар) сыртқы магнит өрісі бағытында орналасқан кезде, ферромагниттік материал қанығады, одан кейінгі магниттеу мүмкіндігі болмайды.

Электротехниканың курсында *магнит қоздырушы күш* (МҚК/МДС/ - магнит қоздырушы күш)) немесе *магниттеу күші* (МК/НС/ - (магниттеу күші)) қарастырылады. МҚК F деп белгіленеді және магнит өрісін қоздыру үшін ток сипатын сипаттайды. Егер, w орамдары бар шарғы арқылы I ток өтетін болса, онда шарғы $MCK F = Iw$ болады.

МҚК — векторлық шама. F_v негізгі полюстерінің МҚК векторы полюстердің осьтері бойынша солтүстік полюстен оңтүстік полюсқа (магниттік индукцияның орташа вектор бағыты сияқты) бағытталған. F_v символының индексінде «в» әрпі машинаның магнит өрісінің қоздыру орамасын білдіреді (полюстер орамасы). 1.12, а - суреттегі «d» әрпі машинаның бойлық осьті білдіреді, яғни полюстер осін.

Сондай-ақ, F_a зәкірдің МҚК векторының бағыты 1.12, а – суретте көрсетілген. Ол зәкір ішіндегі зәкір өрісінің магниттік индукция сызықтар бағытымен анықталады. F_a векторы көлденең q осі бойымен орналасқан, сондықтан, қарастырылған жағдайларда зәкір өрісі көлденең болып табылады.

Зәкірдің магнит өрісінің болуына байланысты, генератордың нәтижелі МҚК векторы зәкірдің айналу бағытында МҚК полюстеріне қатысты айналады. Сол бағытта машинаның бейтараптамасы жылжиды – ЭҚК индукцияланатын жазықтық нөлге тең болады. Бос жүрістегі бейтараптама, 1.12 б - суретте көрсетілген – геометрикалық бейтараптама (г.б./г.н - геометрикалық бейтараптама), сондай-ақ геометриялық бейтараптамаға қатысты а бұрышқа жылжытылған генератордың жұмыс режиміндегі - физикалық бейтараптама (ф.б./ф.н. - физикалық бейтараптама) көрсетілген. Геометриялыққа қатысты физикалық бейтараптаманың жылжу шамасы зәкір тогының мәніне байланысты болады. Әдетте номиналды жұмыс режимінде жылжытуды айтады (зәкірдің номиналды тогында).

Щетка зәкір орамасының бөліктерін қысқа тұйықтаған кезде, бұл бөлігі машина бейтараптамасына жақын орналасуы керек. Енді, біз зәкір реакциясының арқасында қысқа тұйықталу бөлігі физикалық бейтараптама аймағында болуы керек екендігін анықтай аламыз; болмаған жағдайда щеткалар астынан едәуір ұшқын пайда болады. Осы шартты орындау үшін, қабылданатын шаралардың бірі - генераторлық щеткаларды зәкірдің айналу «а» бұрышына жылжыту болады.

Зәкір өрісін өтеу үшін, полюс ұштықтарының бетіне ойықтарға орналастыратын өтемдік ораманы қолданады, сонымен қатар, оның өткізгіштеріндегі ток бағыты зәкір өткізгіштеріндегі ток бағытына қарсы болатындай етіп орнатылады.

Қозғалтқышта зәкір реакциясы. Қозғалтқыштың бос жүрісі – бұл, оның біліктегі механикалық жүктемесіз жұмыс істеу режимі. Осы режимдегі зәкір ораманың тогы нөлге тең болмаса да номиналды жүктемедегі токқа қарағанда әлдеқайда аз болады. Сонымен, бос жүрістегі қозғалтқыштың магнит өрісі генератордың өрісі сияқты оның полюстер ағынымен анықталады.

Механикалық жүктеме ұлғайған сайын, қозғалтқыштың зәкір тогы арта түседі (тиісті үдерістер 3.3, 3.4 бөліктерінде қарасты-

рылған) және магнит өрісінің машинаның нәтижелі өрісіне әсері күшейтіледі. Жалпы, зәкірдің реакциясы қозғалтқыштың магнит ағынынның әлсіреуіне әкеледі, бұл генератордағы сияқты болаттың қанықтығымен түсіндіріледі.

Мысалы, зәкір тоғында және электр қозғалтқыш ораманың тоғында 1.12 – суретте көрсетілген бағыттары болсын (қозғалтқышта екі токтар да тұрақты электр қуатымен қамтамасыз етіледі). Жоғарғы өткізгіште әрекет ететін Ампердің күші сол қол ережесіне сәйкес, сол жаққа бағытталған; төменгі өткізгіште әрекет ететін күш оң жаққа бағытталған. Демек, қозғалтқыштың зәкір айналуы, генератор үшін көрсетілгендей сағат тілінің бағытымен емес, сағат тіліне қарсы айналады. Қарастырылып жатқан жағдайда зәкір мен полюстердің өрістер конфигурациясы генератормен бірдей болады және алынған өрістің суреті 1.12, б-суретке сәйкес келеді. Дегенмен, қазір солтүстік полюс ұштығының оң жақ шеті шоғырланған, ал сол жағы тарқалған (оңтүстіктегі полюстің ұштығы үшін керісінше) болады.

Демек, қозғалтқыштағы физикалық бейтараптаманың қозғалысы, генератордан гөрі зәкірдің айналу бағытына қарама-қарсы қозғалады. Сондықтан қозғалтқыштағы щеткалар қозғалысы айналдыру бағытымен орындалу керек. Егер, тұрақты ток машинасы қозғалтқыш режимінде де, генератор режимінде де қолданылса, щетка қозғалысы қолданылмайды. Осы жағдайда зәкірдің реакциясын өтеу үшін, өтемдеуші ораманы пайдалану керек.

1.7. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАДАҒЫ КОММУТАЦИЯ

Зәкір орамасының бір параллель тармағынан екіншісіне өтіп, сонымен қатар осы жағдайда кездесетін құбылыстар жиынтығын ауыстыру үдерісі *коммутация* деп аталады. Ауыспалы бөлігі қысқа тұйықталған және осы уақытта геометриялық бейтараптамаға жақын орналасқан (щетка жылжуы қарастырылмайды). Полюс өрісі арқылы осы бөлімде келтірілген ЭҚК нөлге жақын болады.

Тікелей коммутация. Р6 және Р3 ойықтарда орналасқан генераторлық зәкірдің ілмекті орамасының бөлігін қарастырайық (1.8, а - суретін қараңыз). Бұл бөлігі, 1.13 – суретте бөлек көрсетіледі. Бастапқыда зәкір өте баяу айналады деп есептейік ($T_{\text{ком}}$ коммутация кезеңі шексіздікке ұмтылады). Бұл болжам қарастырылған бөлімде ток өзгерген кезде өздігінен ЭҚК пайда болуын есепке алмауға мүмкіндік береді. Щетканың ені коллекторлық тілімшенің еніне тең деп

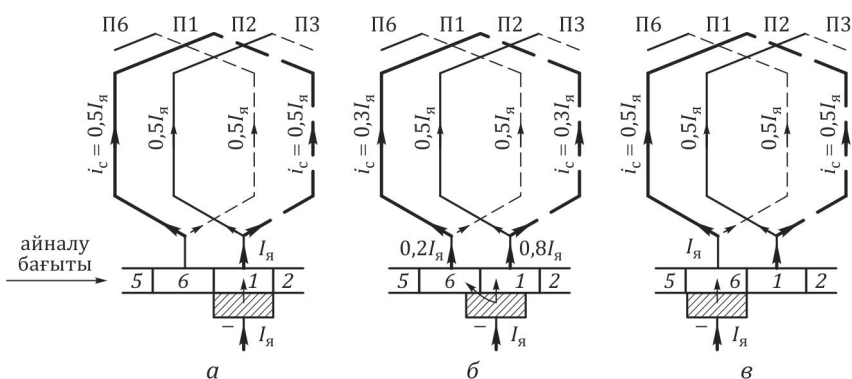
есептейміз.

Бастапқы уақытта ($t = 0$) теріс щетка тек I коллекторлық тілімшемен байланысады (1.13-сурет, a). Осы тілімшемен қарастырылып жатқан бөліктің соңы (бұл бөлім қалың сызықпен бөлінген) және келесі бөліктің басы қосылады. Тілімше I - зәкірдің тогы төменнен ағып жатқан және $0,5I_{я}$ тең бірдей токтар бөліктер торабы болады. (Қарастырылған бөліктің ток ағымы i_c болып белгіленген).

Қарастырылып жатқан бөліктің тогы, торап болмайтын b коллекторлы тілімшесіне жетеді, содан кейін қаралып жатқан бөлікпен қосылып басқа бөлігі арқылы өтеді.

Сипатталған токтарды тарату үдерісі тек белгілі бір сәтте орын алады. Зәкір айналады және щетка коллекторлық b тілімшемен байланыста болады (1.13 b - суретті қараңыз). Осылайша, щетка қарастырылып жатқан бөліктің бас жағы мен соңғы жағын тұйықтайды. Сонымен, щетка мен тілімшенің байланысу ауданы b ұлғаяды және I тілімше мен щетканың байланысу ауданы азаяды. Зәкір тогы $I_{я}$ тармақталады: осы тілімшелер I ток бөлігінде болады және бір бөлігі – b тілімшеде болады. Зәкір тогын тарату щетка мен тілімшенің байланысу аумағына қатысты болады. Мысалы, уақыт кезеңінде $t=0,2T_{ком}$ тілімше I арқылы $0,8I_{я}$ ток жүреді, ал b тілімше арқылы $0,2I_{я}$ тогы өтеді.

Параллель тармақтардағы токтар өзгермейді (бұл көптеген коллекторлық тілімшелерде орындалады) және $0,5I_{я}$ тең (бұл екі параллель тармақтарға қатысты) болады деп есептейік. Осындай жағдай-



1.13.-сурет. Коммутацияға арналған зәкір токтарын бөлу:

$a - t = 0$ уақыт кезеңінде; $б - t = 0,2T_{ком}$ уақыт кезеңінде; $в - t = T_{ком}$ уақыт кезеңінде.

да коллекторлық тілімшелер арқылы қарастырылған бөлімнен $0,5I_{\text{я}}$ токтар ағып жатыр. Демек, I ($0,8I_{\text{я}}$) коллекторлық тілімшенің тогы $0,5I_{\text{я}}$ параллель тармағының тогына және қарастырылған бөліктің тогына бөлінеді $i_c = 0,8I_{\text{я}} - 0,5I_{\text{я}} = 0,3I_{\text{я}}$.

Қарастырылып жатқан бөліктің тогы b коллекторлық тілімшеде ағады. Бірақ, анықталғандай осы тілімшеден зәкірге $0,2I_{\text{я}}$ ток ағады. Тілімшенің $0,2I_{\text{я}}$ тогы және $0,3I_{\text{я}}$ бөлім тогы бірге қосылып, параллельді тармақтың $0,5I_{\text{я}}$ тогын береді.

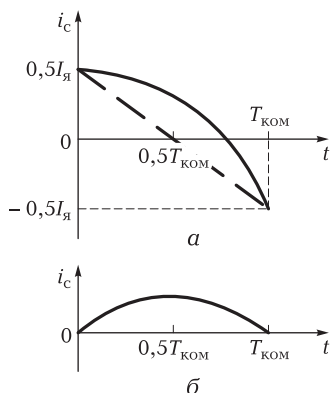
Бірдей $0,5I_{\text{я}}$ токтар I және b коллекторлы тілімшелерге $t = 0,5T_{\text{ком}}$ уақыт кезеңінде қолданылады. Параллель тармақтардың токтары да $0,5I_{\text{я}}$ тең болады және қарастылатын бөлім бойынша ток мүлдем ақпайды: $i_c = 0$. Қарастырылған бөлім сол сәтте геометрикалық бейтараптама жазығында болады. (Осы сәтте токтарды тарату 1.13-суретте көрсетілмеген).

Зәкірдің келесі айналуында I тілімше тогы b тілімше тогынан төмен болады және коммутация аяқтау кезеңінде $t = T_{\text{ком}}$ (1.13 в – сурет) бастапқы уақыттағы 1 тілімше сияқты дәл сондай жағдайда болады.

Бөліктің коммутация кезеңіндегі уақыт арасында қарастырылған бөліктің ток тәуелділігі 1.14 а-суретте штрих сызықпен көрсетілген. Бөліктің ток мәні желілік заңмен, уақыт кезеңінде коммутацияның жарты кезеңіне тең нөл арқылы өзгереді. Осындай коммутация түзу сызықты деп аталады.

Баяу коммутация. Іс жүзінде коммутация кезеңі өте аз, ал i_c бөліктегі ток өте жылдам өзгереді.

Тізбекте токтың өзгерісі, *токтың өзгерісіне кедергі жасайтын*



1.14.-сурет. Тікелей және баяу коммутация:

a — коммутация бөліктегі ток өзгерісінің кестесі; *б* — баяу коммутация кезінде қосымша ток өзгерісінің кестесі

өзіндік индукция ЭҚК пайда болуына әкеледі. Демек, щеткамен қысқа тұйықталған бөлімде электромагниттік индукция заңымен ЭҚК пайда болады:

$$e_s = -L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (1.14)$$

мұндағы L_c — бөлім индуктивтілігі.

Уақыттан ток бөліктері желілік тәуелділікке байланысты болған жағдайда, токтың жылдамдылығы, яғни, уақыт бойынша ток туындысы тұрақты шама болып табылады. Сондықтан бөлікте пайда болатын өзіндік индукция ЭҚК тұрақты мән ретінде қарастырылуы мүмкін.

Қарастырылып жатқан бөліктің тогы коммутация кезінде $0,5I_{я}$ -тен $-0,5I_{я}$ дейін төмендейді. Өзіндік индукцияның ЭҚК ток төмендеуін алдын алып, бөліктің тогымен үйлестіріледі. Бұл жағдайда нақты бөлім тогы сызықты емес коммутацияға қарағанда нөлдік мәннен кейін өтеді (1.14, а суретін қараңыз), сондықтан нақты коммутация баяу болады.

Баяу коммутация кезінде, қарастырылып жатқан бөліктің тогын түзу сызықты коммутация кезінде бөліктің ток сомасы түрінде және өзіндік индукцияның ЭҚК уағдаласқан бөліктің қосымша тогымен ұсынады.

ЭҚК e_s тураланған және қосымша i_s ток ағып жатқан тұйық тізбек келесіні қамтиды: РЗ және Р6 ойықтарға енген қарастырып отырған бөліктің белсенді жақтары (1.13, б - суретті қараңыз), коллекторлы 6 тілімше, 6 тілімше мен щетка арасындағы өтпелі байланыс, щетканың өзі, щетка мен коллекторлы 1 тілімше арасындағы өтпелі байланыс, 1 тілімше. Өтпелі байланыстардың, осы тізбектегі басқа құрамдастарға қарағанда өте үлкен қарсылығы бар. Сондықтан тиісті байланыстардың қарсылығын r_6 және r_1 — мен белгілеп, біз тұйықталған тізбек үшін, Ом заңын қолданып қосымша токты келесі амалмен көрсетуімізге болады:

$$i_s = \frac{e_s}{r_6 + r_1},$$

Осы амалда қарастырылып жатқан тізбекте өтпелі байланыстар жүйелі қосылғаны есепке алынған.

Щетка тек қана 1 тілімшемен $t = 0$ уақыт сәтінде байланысса, щетка мен коллекторлы тілімше арасындағы өтпелі байланыстың қарсылығын $r_{пер}$ деп белгілейік (1.13, а - суретті қараңыз). Сонда, $t = 0,5T_{ком}$ уақыт сәтінде щетка мен сол коллекторлы тілімше арасын-

дағы қарсылық екі есе үлкен болады ($2r_{\text{пер}}$), өйткені ауысу ауданы осы уақытқа дейін азайтылады. Сол сәтте, щетка жарты коллекторы b тілімшемен де байланысып жатады. Ток i_s ағып жатқан тізбекті есепке алсақ, өтпелі байланыстар жүйелі қосылған, $t = 0,5T_{\text{ком}}$ ілездік уақыт үшін болады:

$$r_6 + r_1 = 4r_{\text{пер}}; i_s = \frac{e_s}{4r_{\text{пер}}}.$$

Уақыттың басқа кезеңдерінде өтпелі байланыстардың жалпы қарсылығы көп, ал қосымша ток аз болады деп көрсетуге болады. Атап айтқанда, $t = 0$ және $t = T_{\text{ком}}$ ілездік уақыт аралығында, жалпы қарсылық ($r_6 + r_1$) шексіздікке ұмтылады (щетка коллекторлық тілімшелердің біреуімен ғана байланысады, ал екіншісі ашық болады). Сондықтан, қосымша i_s ток, осы уақыт аралығында нөлге тең болады. Қосымша токтың (1.14, в – суретте көрсетілген) өзгеру сипаты осыған сәйкес келеді.

Баяу коммутация салдары. Баяу коммутация щетканың қашықтық жиегінде ток тығыздығының артуына әкеліп соғады, сондықтан щетка қызып кетеді.

Алайда, баяу коммутацияның негізгі қолайсыз салдары - коллектор мен щетканың айналып өту шетінің арасында ұшқынның пайда болуы. Магнит өрісінің энергиясы

$$W_m = \frac{L_c i_s^2}{2},$$

бөлікпен сақталған, мұндағы L_c — щетка мен коллекторы тілімше арасындағы байланыстарды ашқан кезде электрикалық доға түрінде бөліктің индуктивтілігі белгіленеді.

Бөлек доғалар коллектордың айналасындағы иондалған кеңестіктер бірлескен кезде, бір қуатты доға, ауыр апатты қоздыратын *шеңберленген от* жасау мүмкін.

1.8. КОММУТАЦИЯНЫ ЖЕТІЛДІРУ ТӘСІЛДЕРІ

Коммутацияны жетілдіру шаралары қосымша i_s токты азайтуға бағытталған.

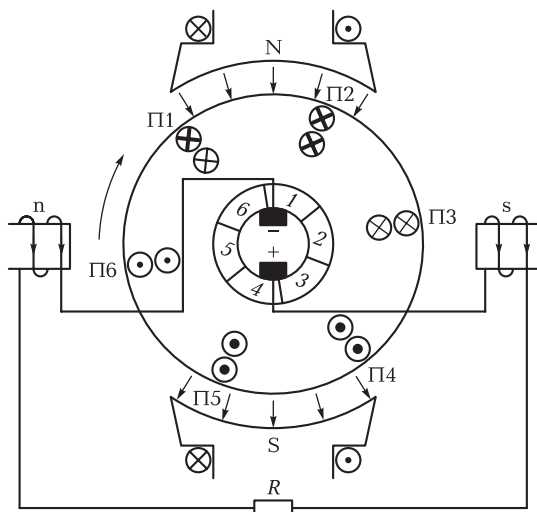
Қосымша полюстер. Байланысқан бөліктерде, пайда болатын өзіндік индукцияның ЭҚК өтеп беру үшін тұрақты ток машинаның геометриялық бейтараптамасында үстеме (қосымша) полюстерді орнатады. Қосымша полюстердің орамасын зәкір ора-

масымен (щетки арқылы) бөлімдерге қосылады.

Тұрақты ток генератордың негізгі (N және S) және қосымша (n және s) полюстері, сондай-ақ зәкірдің белсенді тараптар бөліктері 1.15-суретте көрсетілген. Зәкір орамасының әр белсенді жағында негізгі полюстермен индукцияланған ЭҚК бағыты белгіленген. Екі коммутацияланған бөліктері геометриялық бейтараптама қасында (ПЗ және П6 ойықтарында) орналасқан. Осы бөліктердің біреуі 1 және 6 коллекторлық тілімшелермен, ал екіншісі 3 және 4 коллекторлық тілімшелермен қосылады (сонымен қатар маңдайлы қосылыстарды көрсететін 1.8 - суретті қараңыз). Осы бөліктерде негізгі бағыттар бойынша енгізілген электр қозғалтқыш күштерінің бағыттары 1.15 – суретте жұқа кресттермен және кішкентай нүктелермен белгіленген, бұл ЭҚК бейтараптама қасында шағын екендігін білдіреді.

R жүктемесінде бөліктердегі ток бағыттары ЭҚК бағыттарымен сәйкес келеді. Коммутациялық бөліктерде ток азаяды және жоғарыда айтылғанға сәйкес, төмендейтін тоқты қолдайтын және төменгі коммутацияның себебі болатын e_s өзіндік индукцияның ЭҚК пайда болады. Егер генератордың статорында, орамасының бойымен зәкір тогы өтетін қосымша полюстер орнатылса, онда осы полюстер байланысу бөлігінде қосымша ед ЭҚК туралайтын болады.

Соңғысын өтеу үшін, осы ЭҚК e_d өзіндік индукцияның ЭҚК-ін қарсы бағыттау қажет. Генераторда, осы қосымша оңтүстік полюс



1.15.-сурет. Қосымша полюстермен тұрақты ток генераторы

негізгі солтүстіктегі полюстен кейін (зәкірдің айналу барысында), ал негізгі оңтүстік полюсінен кейін - қосымша солтүстік полюстен кейін орнатылады. Осылайша генератор полюстерінің тізбегі келесідей болуы керек: $NsSn$. Егер негізгі полюстердің жұп саны p бірден көп болса, онда полюстердің аталған тізбегі жалғасады. Төмен қуатты машиналарда қосымша полюстер саны негізгі полюстар санынан 2 есе аз болуы мүмкін.

Тұрақты ток қозғалтқышына тоқталсақ, зәкірдің айналу кезіндегі полюстердің ауысуы әртүрлі болады: $NnSs$. Атап айтқанда, 1.15 – сурет қозғалтқыш полюстерінің дұрыс ауысуын суреттейді, егер R жүктемесі тұрақты кернеу көзіне ауыстырылса және арматураның айналу бағытын қалпына келтірсе (шын мәнінде, егер кресттер мен нүктелер зәкірдің белсенді бөліктеріндегі токтар бағытын көрсетсе, сол қол ережесі қозғалтқыш зәкірінің сағат тіліне қарсы бұрылғанын көрсетеді).

Өзіндік e_s индукцияның ЭҚК зәкір токтарына пропорционалды болғандықтан, оның әртүрлі жүктемелер кезіндегі автоматты өтемақысы үшін қосымша полюстер қанықпаған еді. Бұл қосымша полюстерде ауа саңылауларының артуымен жетеді.

Щеткалардың ығысуы. Зәкір реакциясын азайту мақсатымен, геометриялық бейтараптамадан физикалыққа щеткалардың ығысуы жоғарыда қарастырылған еді (1.6 - бөлімін қараңыз). Щетканың ығысуы, коммутация жағдайларын жақсарту үшін де қолданылады. Екі жағдайда да, машинаға қосымша полюстер орнатылмаған болып есептелінеді.

Щеткалар қозғалысы e_s өзіндік индукцияның ЭҚК өтемдік ЭҚК алуға мүмкіндік береді. Осылайша, қосымша полюстерді орнату сәтіндегідей мәселе шешіледі. Өтемдік ЭҚК құру үшін, щеткалар физикалық және геометриялық бейтараптама арасындағы бұрыштан асатын, геометриялық бейтараптамаға қатысты бұрышқа ығысуы керек. Осы жағдайда бөліктердің коммутациясы, физикалық бейтараптаманы кесіп өтерден бұрын белсенді жақтарда тураланған ЭҚК бағыты бойынша, қарама-қарсы белсенді жақтардың негізгі полюстерімен ЭҚК тураланатын аумақта болады.

Сонымен, егер қосымша полюстерді пайдалану кезінде өзіндік индукцияның электр қозғаушы күші қосымша полюстердің өзіндік индукция электр қозғаушы күшімен өтелген жағдайда, негізгі полюстермен тураланған ЭҚК щеткалар ығысқан сәтте өтемдік болады.

Генераторда щеткаларды ротордың айналу бағытымен, ал қозғал-

тқышта айналу бағытына кері қозғалту керек. Ығыстыру бұрышын көзбен белгілейді: щеткаларды зәкір тогының белгілі бір мәнінде ұшқындауы тоқтағанға дейін ығыстырады.

Қарастырылған коммутацияны жетілдіру әдістің кемшіліктерінің бірі, бұл өзіндік индукцияның ЭҚК өтемдігі зәкір тогының тек бір мәніне ғана байланысты болуы. Бұдан басқа, бұл әдісті айналу бағытын өзгертетін машиналарда қолдануға болмайды.

Коммутацияланған бөліктің кедергісін ұлғайту. Коммутациялайтын бөліктің кедергісін ұлғайтқан кезде қосымша i_s ток азаяды. Бөліктің кедергісіне оның белсенді сымдар мен маңдайлы қосылулар кедергісі жатады; коллекторлы тілімшелермен бөлікті қосатын сымдар кедергісі; щеткалар мен коллекторлы тілімшелер арасында ауыспалы кедергісі, сонымен қатар щеткалар кедергісі. Коммутациялайтын бөліктің кедергісі, ауыспалы кедергі мен щеткалар кедергісі арқылы жиі ұлғаяды. Ол үшін, тұрақты ток машиналарында ауыспалы кедергісінің жоғарғы мәні бар щеткаларды қолданады. Қарапайым қызмет ету машиналарында графит щеткалар қолданылады, төмен вольтты машиналарда – мыс-графитті және қола-графитті щеткалар, ауыр режимде жұмыс істейтін машиналарда көмір-графитті және электр графитті (*электрографит* немесе жасанды графит көміртек түрі болады; әдетте ол жұқа ұнтақталған мұнайдың кокс және көміртеккі қосылулар қоспасын электр пешінде шамамен 3 000 °C температураға дейін қыздыру арқылы дайындалады).

Өзіндік индукцияның ЭҚК азайту. Қосымша полюстерсіз машиналарда e_s мәнін төмендету үшін, әр зәкірде ораулар санын азайту мақсатымен зәкір орамаларының бөліктер санын көбейтуге тырысады, өйткені бұл жағдайда бөліктер индуктивтілігі азаяды. Үлкен және орта қуатты машиналарда, бөліктегі ораулар саны әдетте бірлікке тең болады.

Сол мақсатпен де айналымның номиналды жиілігін төмендетеді. Сонымен бірге, магнитті өрістің күш сызықтарының орамалардың белсенді жақтарын қиып өтетін жылдамдығы азаяды.

Зәкір ойықтарының терең емес, бірақ ашық кең ойықтары пайдалынады. Осының себебінен, коммутациялайтын бөліктермен жасалған сейілту ағындары үшін магнитті кедергі ұлғаяды.

Ескертулер.

Сейілту ағыны бұл, зәкірмен түйіспей, полюстер арасында тұйықталатын машинаның магнитті ағын бөлігі.

Магнитті тізбектің біртекті аймағының магнитті қар-

сылығы $R_m = l/(\mu\mu_0 S)$ формуласымен есептеледі, мұндағы l және S – магнитті тізбек аймағының ұзындығы және көлденең қимасы; μ – тізбек материалының салыстырмалы магнитті өтімділігі; μ_0 – магниттік тұрақты шама.

Сонымен, жоғарғы магнитті өткізгішімен сипатталатын ферромагнит материалының нұсқасында магнитті кедергісінің, дәл сондай көлемі бар магнитті емес материалдан жасалған нұсқалардан гөрі, едәуір төмен болады. Магнитті тізбектің магнитті кедергісі төмен болған сайын, орамада осындай ток кезінде орнатылатын магнитті ағын ұлғаяды.

Қысқа u_1 қадамды орамалар e_s мәнін төмендету үшін қолданылады (1.8, б, және 1.10-суреттерді қараңыз). Толық қадам жасалғанда бір ойықта орнатылған коммутациялайтын бөліктер жақтарының бөлігі іргелес ойықтарға ауысады, бұл коммутациялайтын бөлімдер арасында магнитті ағынның төмендеуіне алып келеді.

Едәуір үлкен щеткаларды орнатады. Бұл шара бөліктің коммутация кезеңін ұлғайтуға, яғни оның ішіндегі токтың өзгеру жылдамдығын азайтуына алып келеді. Бірақ, кең щетка коллекторлы тілімшелердің көп санын жабады, сонда *өзара индукцияның* ЭҚК жоғарылауын болдыратын бөлімдердің көп санын бірге байланыстырады. Екі-үш коллекторлы бөліктерді қамтитын, ені кең щетканы қолдану дұрыс.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Магнит өрісінде жылжытылатын өткізгіш мысалында электр машина генераторының жұмыс қағидасын түсіндіріңіз
2. Тұрақты генератордағы коллектордың рөлі қандай? Коллекторлық тілімшелер санын көбейтудің әсері қандай?
3. Статор орамаларының және тұрақты ток машина зәкірінің қызметі қандай?
4. «Дестеленген» термині дегеніміз не? Полюстердің және зәкірдің өзектері қандай мақсатпен дестеленген болады?
5. Тұрақты ток машинадағы зәкірдің қарапайым ойығы деген не? Қарапайым ойықтар саны, зәкір орамасының бөліктер саны және коллекторлы тілімшелер саны бір-бірімен қалай байланысады?
6. Қарапайым ілмекті ораманың айрықша ерекшелігі қандай? Осындай орамалардың параллель тармақтарының саны қандай болады?
7. Күрделі ілмекті орамасын қандай мақсатпен орындайды?

8. Зәкір орамасында бірінші және екінші түрдегі трансформациялық жалғауларды қандай мақсатпен жасайды?
9. Қарапайым және күрделі толқынды орамалардың қандай айрықша ерекшеліктері бар? Осы орамалардың параллель тармақтарының саны қалай анықталады
10. Әртүрлі орамалардың қолдану салалары қандай? Аралас түрдегі ораманың артықшылығы қандай?
11. Тұрақты ток машинасында зәкір реакциясының көрінісі қандай болады? Қозғалтқыш пен генератордағы зәкір реакциясының ерекшеліктері қандай?
12. Тұрақты ток машинасында коммутация деп нені атайды? Баяу коммутацияның себептері мен салдары қандай?
13. Коммутацияны жақсарту жолдарын атаңыз және сипаттаңыз.

ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЛАРЫ

2.1. ПӘК ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЫ- НЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ДИАГРАММАСЫ

Тұрақты ток генераторының ПӘК. Электр машиналық (электр механикалық) генератор механикалық энергияны электрикалыққа өзгертеді. Осы өзгеріс үдерісінде энергия жоғалтулары пайда болады, сондықтан, генератор сыртқы тізбекке беретін P_2 пайдалы қуаты P_1 тұтынылатын механикалық қуаттан (білікке арналған қуат) әрқашан аз болады. Барлық қуат шығындарының сомасын $\sum P$ деп белгілейік. Сонда біз,

$$P_1 = P_2 + \sum P \quad (2.1)$$

деп жаза аламыз.

Кез-келген машина немесе механизмнің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) пайдалы қуаттың тұтынылатын қуатқа қатынасы болып табылады. Тұрақты ток генераторының пайдалы қуаты генератордың қысқыштарында U кернеуінің және жүктемеге берілген I тогының туындысына тең: $P_2 = UI$. Содан, генератордың ПӘК болады:

$$\eta_r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{UI}{UI + \sum P}. \quad (2.2)$$

(2.2) өрнекті басқа түрге айналдырайық, соны алымға қосамыз және одан $\sum P$ мәнін шығарамыз:

$$\eta_r = \frac{UI + \sum P - \sum P}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (2.3)$$

Сонымен, пайдалынатын қуаттан шығындар үлесін көрсететін генератордың ПӘК-і бірліктің шамасынан аз болады.

10 кВт қуаты бар тұрақты ток машиналарында шамамен 0,85 (85%), ал 1000 кВт қуат шамасындағы машиналарда шамамен 0,95 (95%) ПӘК бар.

Тұрақты ток генераторының энергетикалық диаграммасы. Пайдалы қуатқа айналдыру үдерісіндегі тұтынатын қуат шығыны,

2.1 – суретте бейнеленген.

Тұрақты ток генераторымен тұтынылатын P_1 механикалық қуаты келесі шығындарды жабу үшін қолданады:

- $P_{\text{мех.п}}$ механикалық шығындар (мойынтіректердегі үйкеліс, коллекторға щеткалардың үйкелісі, ауаға үйкелісі мен басқа үдерістермен машина бөлшектеріне үйкеліскен желдету шығындары);
- статордың болаты мен зәкірді қайта магниттеумен пайда болған гистерезис және құйынды ток шығындарын өзіне енгізген P_c болаттағы шығындар (магнит өткізгішінде);

P_1 механикалық қуатының негізгі бөлігі электрмагниттік қуатқа айналады (1.1 - бөлімін қараңыз):

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{мех.п}} + P_c).$$

Теңдеулерге сәйкес (1.5) электрмагниттік қуат, зәкір тогына генератордың ЭҚК-нің көбейтіндісімен анықталады: $P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}}$. Егер, генератордың негізгі магнит ағыны тұрақты магнитпен жасалатын болса немесе генератордың тәуелсіз қоздыруы қолданылса, $I_{\text{я}}$ зәкір тогы I жүктеме тогына тең болатының айта кетейік (2.3-бөлімін қараңыз).

Генератормен желіге берілген $P_2 = UI_{\text{я}}$ пайдалы қуаты, зәкірде $P_{\text{я}}$ электрлік шығындар шамасына электромагнитті қуатынан аз болады, яғни $P_{\text{об}}$ зәкір орамасында және $P_{\text{щ}}$ щетка байланыстарында: $P_{\text{я}} = P_{\text{об}} + P_{\text{щ}}$. Сонымен;

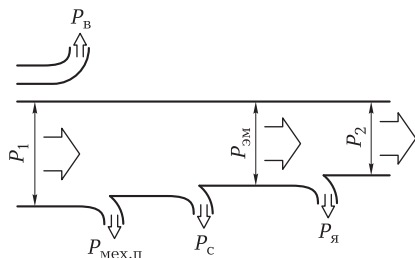
$$P_2 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{об}} + P_{\text{щ}}) = P_{\text{эм}} - P_{\text{я}}.$$

Пайдалы және электрмагниттік қуаттарының өрнектерін ескере отырып, соңғы теңдеуді қайта жазамыз:

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} - I^2 R_{\text{я}},$$

осында зәкірдегі шығындар қуаты Джоуль— Ленц заңына сәйкес ұсынылған, ал $R_{\text{я}}$ - зәкірдің жалпы қарсылығы.

Осы өрнектен генератордың теңдеуі шығады:



2.1.-сурет. Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторының энергетикалық диаграммасы

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (2.4)$$

Осы теңдеу, көздің ішкі кедергісінде кернеудің төмендеу шамасына оның қысқаштарында ЭҚК көзі кернеуден көп болатыны туралы, электр техниканың белгілі қорытындысымен келісілген.

Қоздыру тізбегінде (статор орамасының тізбегінде) шығындарды жабу үшін қажетті $P_{\text{в}}$ қуат 2.1 - суретте жекелеп көрсетілген. Бұл, $P_{\text{в}}$ қуаты P_1 жеткізілген қуатының бөлігі болмайтын тәуелсіз қоздыру генераторы үшін орынды болады. Өздігінен қоздыру генератордың энергетикалық диаграммасында қоздыру тізбегінде шығындалатын қуатты $P_{\text{я}}$ қуатының жанында көрсету қажет, яғни $P_{\text{эм}}$ және P_2 аралықта, өйткені ондай генератордың $P_{\text{в}}$ қуаты электромагнитті қуатының бір бөлігі болып табылады.

Энергетикалық диаграмма (2.1-суретті қараңыз) қарапайым екенін ескеру қажет, себебі онда тек генератордың негізгі шығындары ескерілген. Сонымен қатар, олардан басқа үстеме немесе қосымша шығындар да орын алады.

Үстеме шығындар, атап айтқанда, зәкір өзегінің тісті құрылымымен, яғни оның ішіндегі ойықтар мен тістері болғандықтан (ойықтардың аралықтары) пайда болған. Зәкір айналған сәтте полюс ұштығының бетіндегі әрбір нүктесінде магниттік индукция өтіп тұрады. Магниттік индукция зәкір тісі қарастырылып жатқан нүктеге қарсы болған кезде максималды болады, ал осы нүктеге қарсы зәкір ойығы болса минималды болып табылады.

Полюс ұштықтарындағы магнит өрісі өтіп тұрғандықтан, генератордың жарты энергиясын тұтынатын құйынды токтарды индукциялайды. Үстеме шығындардың осы түрінің шамасы магниттік индукцияның лүпіліне (лүпіл ашық зәкір ойықтардың жағдайында үлкен), лүпілдердің жиілігінде (зәкір ойықтарының санына және зәкір айналу жиілігіне байланысты), полюстерден жиналған болат тақтасының қалыңдығына және тақталар арасындағы оксидтік қабықшаның оқшаулағыш қасиеттеріне байланысты болады.

Үстеме шығындарға, сондай-ақ, полюстердің магнит өрісінде айналған сәтінде сым құрсауларында және басқа да бөлшектерде пайда болған шығындар жатады. Аталған үстеме шығындардың екі түрі жүктеме болмаған кезде де айналмалы машиналарда пайда болады, сондықтан олар *бос жүріс шығындары* болып табылады.

Машина жүктелген кезде, зәкір реакциясының әсерінен ауа саңылауында магниттік өрісті бұрмалауға байланысты (1.6 - бөлімді қараңыз), сондай-ақ коммутация кезінде үстеме ток пайда болуына

байланысты (1.7 - бөлімін қараңыз) үстеме шығындар пайда болады.

2.2. ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЭЛЕКТР ҚОЗҒАУШЫ КҮШІ

Электр машиналық генераторының жұмыс қағидасын ашып көрсеткенде келтірілген дәлелдерге сүйене отырып (1.1 - бөлімді қараңыз), тұрақты ток машина зәкірінде индукциялайтын ЭҚК қандай факторларға байланысты екенін анықтап көрейік. Пайда болған нәтиже электр машиналарын кейінгі зерттеулерінде маңызды болады.

В индукциясымен магнит өрісінің күштеріне перпендикуляр v жылдамдықпен сыртқы күшпен жылжытылған l белсенді ұзындықпен өткізгіште пайда болатын ЭҚК (1.1) формуласымен анықталады. Электр машинасының жағдайында, индукция статордың айналасында тұрақты болмайды. Полюс ұштығының ортасында, оның ең үлкен мәні бар, ал геометриялық бейтараптамада индукция нөлге тең болады (егер зәкір реакциясының әсері есепке алынбаса). Сондықтан, орташа магниттік индукция B_{cp} және зәкір орамасының бөлек белсенді өткізгіштерінде индукцияланатын E_{cp} орташа ЭҚК пайдалану ыңғайлы. Сонда (1.1) орнына жазамыз

$$E_{cp} = B_{cp} l v \quad (2.5)$$

Зәкір орамасының қағидаларын қарастырған кезде, машинаның ЭҚК барлық тураланған бір параллель тармақтың белсенді жақтарымен жүйелі қосылған ЭҚК сомасы болып есептеледі ((1.11)-теңдеуді қараңыз). Жалпы жағдайда, ораманың әр бөлігі бір-бірімен бірнеше жүйелі қосылған орамдардан тұрады, бұл мәлімдемені нақтылауға болады: машинаның ЭҚК барлық тураланған бір параллель тармақтың белсенді жақтарымен жүйелі қосылған ЭҚК сомасын ұсынады.

Егер N - зәкір орамасының белсенді өткізгіштерінің жалпы саны болса, онда бір параллельді тармаққа $N/(2a)$ белсенді өткізгіштер келеді, мұндағы « a » әрпі ораманың параллель тармақтар жұптарының санын білдіреді. Сонда машинаның ЭҚК келесі түрде көрсетіледі:

$$E = E_{cp} \frac{N}{2a} = B_{cp} l v \frac{N}{2a},$$

бұл жерде белсенді өткізгіштердің ЭҚК сомасы параллель тармақтың өткізгіштер санына орташа ЭҚК көбейтіндісімен ауыстырылады.

Зәкір айналған кезде белсенді өткізгіштің желілік жылдамдығы («айналмалы» жылдамдық) $v = L_{\text{окр}}/T_{\text{вр}}$, мұндағы $L_{\text{окр}}$ - зәкір шеңберінің ұзындығы; $T_{\text{вр}}$ - айналу кезеңі. Зәкірдің үстінде $2p$ полюстер бар, онда зәкір шеңберінің ұзындығын τ полюсті бөлу арқылы осындай жолмен көрсетуге болады: $L_{\text{окр}} = 2p\tau$. Сызықтық жылдамдық үшін болады: $v = 2p\tau/T_{\text{вр}}$.

Секундпен өлшенетін $T_{\text{вр}}$ айналу кезеңі, секундына айналыммен өлшенген айналу жиілігіне кері $f_{\text{вр}}$ шама болып табылады: $T_{\text{вр}} = 1/f_{\text{вр}}$ (екі полюсті машинада $f_{\text{вр}}$ айналу жиілігі ЭҚК индукциялайтын f жиілігімен сәйкес келеді; $2p$ полюсі бар машинада, $f = pf_{\text{вр}}$).

Зәкірдің айналу жиілігін, 1.1-бөлімде көрсетілгендей минутына айналуымен өлшенеді және n болып белгіленеді. Әрине, $f_{\text{вр}} = n/60$ және $T_{\text{вр}} = 60/n$ болады. Сонда жылдамдықтың өрнегі келесідей жазылуы мүмкін:

$$v = \frac{2p\tau n}{60}.$$

Машинаның ЭҚК теңдеуінде жылдамдықтың алынған мәнін қоямыз және келесіні аламыз

$$E = B_{\text{ср}} l \frac{2p\tau n}{60} \frac{N}{2a}.$$

$l\tau$ полюстік бөлу аймағын көрсететінін айта кетейік, онда $B_{\text{ср}} l\tau$ көбейтіндісі Φ бір полюстің магнитті ағынын ұсынады (егер, магнитті индукция сызықтары осы аймаққа тік бұрышпен енетін болса, S ауданмен аймақ арқылы магнитті ағын, ауданға аймақтың шегінде B магнитті индукцияның бөліндісіне тең болатынын ескертейік: $\Phi = BS$).

Жоғарыда көрсетілгендерді ескере отырып, ЭҚК өрнегін жеңілдетейік:

$$E = \Phi \frac{pnN}{60a}.$$

p , N , a шамалары машина конструкциясына байланысты болады. Осы шамаларды, c_e конструктивті тұра шаманы енгізе отырып санды коэффициентімен біріктірейік:

$$c_e = \frac{pN}{60a}. \quad (2.6)$$

Тұрақты ток машинасының электр қозғалтқыш күшінің соңғы шамасын аламыз

$$E = c_e \Phi n. \quad (2.7)$$

Осылайша, машинаның ЭҚК магниттік ағынға және зәкірдің ай-

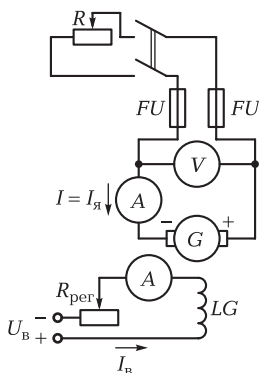
налу жиілігіне пропорционалды болады, сонымен ЭҚК полюстер жұптарының санына, ораманың өткізгіштер санына және параллель тармақтардың жұптарына тәуелділігі машинаның конструктивті тұрақтылығында болады. *Алынған ЭҚК шама тек генератор үшін ғана емес, сондай-ақ, ЭҚК зәкір тогына қарама-қарсы болатын қозғалтқыш үшін де жарамды екенін* ескеру маңызды (3.1- бөлімін қараңыз).

2.3. ТӘУЕЛСІЗ ҚОЗДЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЫ

Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторын қосу сұлбасы. *Тәуелсіз қоздыру* генераторында қоздыру орамасы (негізгі магниттік ағынын құрайтын басты полюс орамасы) тәуелсіз тұрақты кернеу көзінен қуат алады. Қоздырудың осы әдісі, генератор кернеуін реттеу қажет болған жағдайда қолданылады. Қозғалыс сұлбасы бойынша тұтынылатын қуат генератормен өндірілетін номиналды қуатының 1...5% құрайды.

G генератордың R кедергісімен жүктеме тізбегіне қосылу сұлбасы 2.2-суретте көрсетілген. LG қоздыру орамасы U_B тәуелсіз кернеу көзінің тізбегіне қосылған. Қоздыру тізбегінде қоздыру тоқты I_B реттеу үшін $R_{\text{рег}}$ реттеуші кедергі орнатылған (техникалық әдебиетте, ток қоздыруын белгілеу үшін I_f символы қолданылады, мұндағы « f » ағылшын тілінен *field* - өріс мағынаны білдіреді: аталған жағдайда магниттік өріс туралы айтылған).

Генератордың бос жүріс (XXX) сипаттамасы. Бұл сипаттама, оның n зәкір айналуының тұрақты жылдамдығын және ашық жүк-



2.2.-сурет. Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторының сипаттамаларын өлшеу сұлбасы

теме тізбегінің I_B қоздыру тогынан E ЭҚК тәуелделігін ұсынады. ХХХ-дің практикалық құндылығы *машинадағы магнит тізбегінің қанықтылық дәрежесін* анықтау үшін қолданылуы мүмкін, себебі генератордың ЭҚК полюстердің магнит ағынымен пропорционалды (2.7-тармақты қараңыз) болады. Сонымен қатар, бұл сипаттама машинаның басқа сипаттамаларын жасау үшін қолданылады.

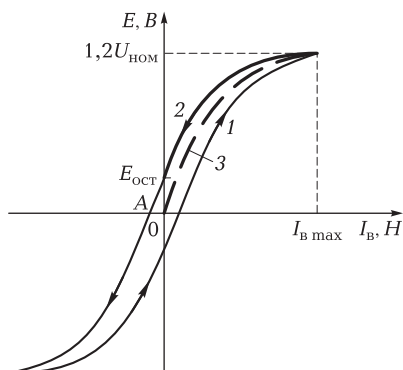
Егер, қоздыру тогын тек қана тағайындау бойынша ғана емес, бағытына қарай өзгертіп, содан кейін төрт координаттық төрттік-те қоздыру тогынан ЭҚК тәуелділігін құрсақ, нәтижесінде пайда болған кесте ілмек тәріздес болады (2.3-сурет).

Қоздыру тогын ұлғайту немесе төмендету кезінде қисықтардың сәйкес келмеуі, машинаның магниттік жүйесінде *гистерезиспен* түсіндіріледі, яғни ферромагниттік материалдағы B магниттік индукцияға тәуелділігімен H магнит өрісінің күшіне ғана емес, сондай-ақ алдыңғы ферромагнетик жағдайға байланысты болады.

Генератордың магнит өрісінің кернеулік шамасы оның полюстерінің орамасындағы токқа пропорционалды болады (оның орталық бөлігінде магнит өрісінің кернеуі $H = Iw / l$, мұндағы I – шарғыдағы ток, w – шарғыда орамдар саны, l – шарғының ұзындығы).

Келтірілген мәліметтерге сүйене отырып, генератордың қоздыру E тогынан ЭҚК тәуелділігінің кестесі, бұл басқа ауқымда салынған генератордың магниттік тізбегінің магниттеу сипаттамасы, яғни H кернеуден B өрісінің индукция тәуелділігінің сызбасы деген тұжырымға келеміз.

Бос жүріс режимінің есептік сипаттамасы 3-қисық сызық ретінде қабылданады, ол координаталар басында және тәжірибелік сипаттаманың 1 ұлғаймалы және 2 төмендеуші тармақтарының арасында



2.3.-сурет. Генератордың бос жүріс сипаттамасы:

1 — ұлғаймалы тарам; 2 — төмендеуші тарам; 3 — есептелген сипаттама

басталады. Есептелген сипаттамалар 2.3 – суретте 3 – штрихталған қисық сызықпен көрсетілген.

Практикалық мақсаттар үшін, әдетте, *сипаттаманың төмендеген бөлігінің* тәжірибесінен алуға болады, ол үшін қоздыру тогын I_B максималды мәннен $I_B \max$ нөлге дейін төмендетеді (2-суреттегі тегіс қалын сызық 2).

Максималды ретінде, генератордың ЭҚК $1,2U_{\text{ном}}$ тең мәнді қабылдайтын қоздырушы ток таңдалынады, мұндағы $U_{\text{ном}}$ - генератордың номиналды кернеуі. Қоздырушы ток нөлге тең болса, генератордың ЭҚК нөлге тең болмайды; ол $U_{\text{ном}}$ генератордың номиналды кернеуінен $1...3\%$ құрайтын мәнін алады. Бұл, *машинадағы қалдық магнит өрісімен* уағдаласқан $E_{\text{ост}}$ ЭҚК *қалдығы* деп аталады: қоздырушы тогының көмегімен пайда болатын сыртқы магнит өрісі жойылғанымен, полюстер мен зәкірдің ферромагниттік өзектері толығымен магнитсізденбейді (магнит өрісінің қалдығының бар болуы ферромагниттің магниттелу сипаттамасының, сондай-ақ генератордың ХХХ-нің ілмек түрі болуының себебі болды).

Қоздырушы тогының белгілі бір аралықта сипаттаманың төменгі бөлігін алғаннан кейін ол A нүктесінде абсцисс осімен қиылысқанша жалғасады, содан кейін AO қашықтыққа оң жаққа қарай параллельді ауысады. Нәтижесінде, бос жүріс сипаттамасына сәйкес келетін 3 қисық сызық пайда болады.

Бос жүрістің бастапқы түзу сызықты бөлігі генератордың магниттік жүйесінің қанықпаған күйіне сәйкес келеді, ал полюстердің магниттік ағыны қоздырушы тогына пропорционалды түрде ұлғаяды.

Магниттік ағынның ұлғаюын одан әрі төмендету магниттік жүйенің қанықтылығына байланысты болады. (Толық қанықтылықта ферромагнетиктің барлық домендерінің магнит өрісі сыртқы магнит өрісі бойымен бағытталады. *Домендер* - өздігінен ерікті магниттелетін аймақтар).

Генератордың номиналды кернеуіне сәйкес келетін нүкте көбінесе бос жүріс сипаттамасының иінінде, яғни сыну аймағында орналасады. Бастапқы сызықты бөлігіндегі номиналды кернеу мәнін таңдау сәтсіздікке ұшырар еді, өйткені ЭҚК айтарлықтай өзгерісі қоздырушы ток өзгерген кезде осы бөлімнің шегінде болады. Қанықтыру аймағындағы мән $U_{\text{ном}}$ басқа тәсілмен таңдалмайды, өйткені, біріншіден, бұл жағдайда генераторды басқару үшін үлкен қоздырушы ток талап етіледі, екіншіден, осы аймақта кернеуді реттеу шектеулері шектелген.

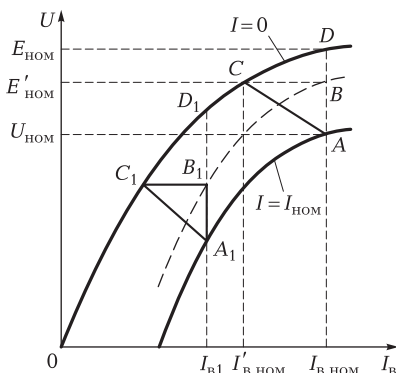
Жүктемелік сипаттамасы. Бұл, I тұрақты ток жүктемесі (осы жағдайда, зәкір тогына) және n зәкірдің тұрақты айналу мәні бар жиілігінің I_B қоздырушы тогындағы генератор шықпаларында U кернеуінің тәуелділігі. Жүктемелік сипаттамасының ерекше жағдайы ($I = 0$) 2.4 – суретте көрсетілген жүктеменің сипаттамасымен номиналды ток ($I = I_{\text{ном}}$) кезінде алынған бос жүріс сипаттамасы болады.

Жүктеме тогының әртүрлі мәндері үшін жүктемелік сипаттамаларының тұтас тобын алуға болады. Егер бір сипаттамасы жойылса, бұл көбінесе жүктеменің номиналды тогы үшін жасалады.

Жүктемелік сипаттамасы ХХХ-ден төмен орналасады, яғни генератордың ЭҚК қоздыру тогының әрбір берілген мәні үшін жүктеме кезінде жұмыс істегенде оның кернеуі артығырақ болады. Бұл сипаттамалардың орналасуы екі себепке байланысты болады: *зәкір тізбегіндегі кернеудің төмендеуі* ((2.4) теңдеуін қараңыз) және *зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекеті* (1.6 бөлімін қараңыз).

Жүктемелік сипаттамасын және бос жүріс сипаттамасын қолдану арқылы, аталған екі фактордың әрқайсысының генератордағы кернеудің төмендеуіне әсерін көрсететін *сипаттамалық үшбұрыш* жасауда. *ABC* сипаттамалық үшбұрыш құрылысын қарастырайық (2.4-суретті қараңыз).

Жүктеме сипаттамасының A нүктесі генератордың номиналды жұмыс режиміне сәйкес келеді, яғни номиналды қоздырушы $I_{B, \text{ном}}$ тогында номиналды жүктеме $I_{\text{ном}}$ тогына және генераторлық қысқыштарда номиналды $U_{\text{ном}}$ кернеуге. Егер жүктемені өшірсек, онда дәл сондай қоздырушы тогында генератордың қысқыштарындағы кернеу E генератордың ЭҚК мәніне дейін көтеріледі. Осылайша, AD кесіндісі жүктемеде кернеудің төмендеуін сипаттайды.



2.4. - сурет. Жүктемелік сипаттама және сипаттамалық үшбұрыш

Зәкір тізбегінде кернеудің төмендеуімен ғана уағдалы кернеудің төмендеуі, номиналды режимде $I_{\text{ном}} R_{\text{я}}$ тең, мұндағы $R_{\text{я}}$ «тікелей өлшенген зәкірдің кедергісі. A нүктесінен тік сызықпен жоғары қарай $I_{\text{ном}} R_{\text{я}}$ кернеудің төмендеуіне тең (кернеу шкаласы бойынша) AB кесіндісін жүргізейік. Жүктемелік сипаттамасының барлық нүктелері бірдей жүктеме тогына сәйкес келетінің еске түсірейік, осы жағдайда номиналды ток $I_{\text{ном}}$ сәйкес. Осы себепті зәкір тізбегіндегі кернеудің төмендеуін сипаттайтын кескін жүктеме сипаттамасының барлық нүктелері үшін бірдей ұзындыққа ие болады. Атап айтқанда, I_{B_1} қоздыру тогы үшін құрылған A_1B_1 кескіні, номиналды қоздыру тогы үшін құрылған AB кескініне тең болады. Жүктемелік сипаттаманың әртүрлі нүктелерінен AB кескініне тең көптеген тік кескіндер жиынтығын бөліп қойып, негізгі полюстердің (2.4-суреттегі штрих сызық) өріспен зәкір орамасындағы тураланған ЭҚК қисық сызықтың жоғарғы ұштарын солар арқылы шығарамыз. Бұл қисық сызық бос жүрістен төмен өтеді, өйткені ол құрылған кезде зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекеті қарастырылмаған еді.

Жоғарыда айтылғандай, қоздыру тогының әртүрлі мәндері үшін зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекеті, негізгі полюстердің (2.4 суреттегі BD және B_1D_1 кескіндері) өрісімен тураланған ЭҚК қисық сызық пен бос жүріс сипаттамасы арқылы тік кескіндермен сипатталады.

Зәкір реакциясының әсерін, қоздыру тогының BC және B_1C_1 өлшемінде өлшенетін кескіндерімен сипаттауға болады. Мұны келесіден көруге болады.

B нүктесі арқылы көлденең тік сызықты жүргізейік. Бос жүріс сипаттамасымен осы түзу сызықтың қиылысу нүктесін C (бұл ABC сипатталатын үшбұрыштың үшінші нүктесі) деп белгілейміз. C нүктесінен өтетін тік сызық көлденең осінде $I'_{\text{в.ном}}$ қоздыру тогын нұсқайды, бұл жердегі генератордың ЭҚК $E'_{\text{ном}}$ - ге тең болады.

$I'_{\text{в.ном}}$ қоздыру тогы, зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекеті болмаған жағдайда генератордың шықпасында номиналды кернеуді қамтамасыз етеді. Нақты жағдайда, зәкір реакциясы орын алғанда, бұл токты сол $I_{\text{в.ном}}$ мәнге дейін көтеру керек. $I_{\text{в.ном}}$ және $I'_{\text{в.ном}}$ токтарының айырмашылығы зәкір реакциясының магнитсіздендіру әрекетіне өтемін береді.

Номиналдыдан төмен қоздырушы ток үшін құрастырылған $A_1B_1C_1$ сипаттамалық үшбұрыштың, ABC үшбұрышының BC жағына сәйкес B_1C_1 жағынан кіші көлденең катеті бар. Қоздыру тогында I_{B_1}

генератордың магниттік жүйесі толық емес және зәкір реакциясының магнитсіздендіру әсері номиналды қоздыру тогына қарағанда, осы жағдайда төмен болады. Сипаттамалық үшбұрыш генератордың басқа сипаттамаларын бос жүріс сипатамасы бойынша құруға мүмкіндік береді.

Сыртқы сипаттама. Бұл, егер қоздыру тізбегіне ешқандай әсерін тигізбесе (тәуелсіз қоздыру генератордың жағдайында бұл шартқа қоздырушы ток тұрақтылығы сәйкес болады) және егер зәкірдің айналу жылдамдығы тұрақты болса, I ток жүктемесін өзгерту кезінде машинаның шықпасында U кернеу өзгерісін көрсететін генератордың негізгі пайдалану сипаттамасы болады.

Жоғарыда айтылғандай, генератордың қысқыштарында жүктеме тогы ұлғайған кезде, кернеу зәкір тізбегіндегі кернеудің төмендеуінен және зәкір реакциясының магнитсіздену әрекетінен төмендейді.

Сыртқы сипаттаманы алғаннан кейін, номиналды режим бастапқы нүкте болып табылады.

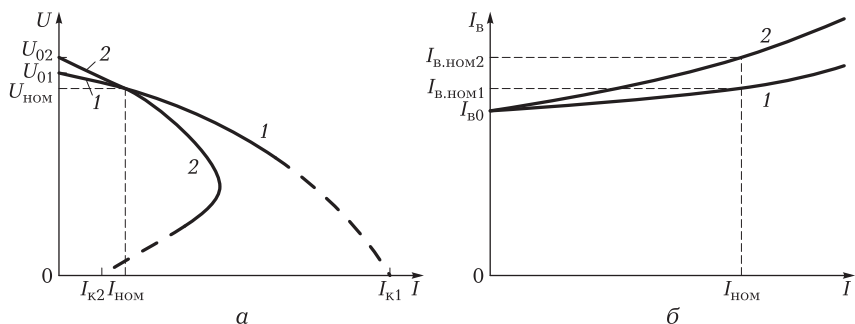
Осы режимді қосу үшін жүктеменің ажыратқышын тұйықтайды (2.2-суретті қараңыз) және генератор қысқыштарында $U_{\text{ном}}$ номиналды жүктеме $I_{\text{ном}}$ номиналды жүктемесін қабылдайтындай етіп, R жүктемесі мен $I_{\text{в}}$ қоздырушы ток қарсылығын реттейді. Бұл жағдайда қоздырушы ток, $I_{\text{в.ном}}$ номиналды қоздырушы тогы болады. Номиналды режимді орнатқаннан кейін, генераторды біртіндеп босатады (жүктеме қарсылығын арттырады). Жүктеме тогы азайып, генератор қысқыштарында кернеу артады. Бос жүру режимде, яғни жүктеме тізбегі ашылғанда, генератор кернеуі ЭҚК тең, U_{01} ең үлкен мәнді қабылдайды (2.5 а-сурет, 1 қисық сызық).

Сыртқы сипаттамалар бойынша, бос жүрістен номиналды режимге дейін номиналды кернеуге қатысты Δu кернеуіндегі номиналды кернеуге қатысты пайыздық өзгеруді анықтайды:

$$\Delta u = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (2.8)$$

Егер, генератор жүктеуін номиналды режимнен бастасаңыз (жүктеме кедергісін азайту), онда кернеу төмендейді. Сыртқы сипаттамасы көлденең осьтен (кернеу U нөлге тең болады) нөлдік жүктеме кедергімен қиылысады. Осы жағдайда сыртқы тізбектегі ток (қысқа тұйықталу тогы $I_{\text{к}}$) жүктеменің номиналды тогын 5-10 есе асады. Қысқа тұйықталу режимі тәуелсіз қоздырушы генераторы үшін апатты болады.

Сыртқы сипаттамаларды алған кезде, бос жүріс режимі де баста-



2.5.-сурет. Тұрақты ток генераторларының сипаттамасы:
а — сыртқы; *б* — реттеуші; 1 — тәуелсіз қоздыру генераторы; 2 — параллель қоздыру генераторы

пқы болуы мүмкін. Осындай жағдайда, жүктеме болмаған кезде қоздырушы тогын генератор қысқыштарындағы кернеу номиналды немесе одан асатындай етіп орнатылады.

Сыртқы сипаттама бос жүріс сипаттамасының және сипаттама-лық үшбұрыштың көмегімен жасалу мүмкін.

Реттемелік сипаттамасы. Бұл сипаттама, жүктеме тогын өзгерту кезінде генератордың шықпасында кернеу өзгермейтін және көбінесе $U_{ном}$ мағынасына тең болып қалатындай қоздырушы тогын қалай өзгерту керектігін сипаттайды. Осылайша, реттемелік сипаттама I_B қоздырушы тогының U генератор кернеуінің тұрақты мәндерінен және n экірдің айналу жиілігінен I жүктеме тогынан тәуелділігі болып табылады. Бұл сипаттама, кернеудің төмендеуін өтеу үшін, жүктеме тогын ұлғайтқан кезде қоздыру токты ұлғайту қажеттігін көрсетеді (2.5, б-сурет, 1 қысық сызық).

Реттемелік сипаттаманы қабылдау кезінде алдымен ажыратылған жүктемеде генератордың қысқыштарында $U_{ном}$ номиналды кернеу орнатып I_{B0} қоздырушы токты қосады.

Содан кейін, ол жүктеме тізбегін тұйықтайды және жүктеменің қарсылығын төмендетеді, сонымен бірге генератордың қысқыштарында кернеуді өлшеуші вольтметр көрсеткішін өзгертпеу үшін қоздырушы тогын реттейді (2.2-суретті қараңыз).

Қоздырушы токты реттеу шегі

$$\Delta i_B = \frac{I_{B,ном} - I_{B0}}{I_{B,ном}} 100. \quad (2.9)$$

қатынаспен сипатталады.

Сыртқы сипаттама сияқты реттемелік сипаттамасын да бос жүріс сипаттаманы және сипаттамалық үшбұрышты пайдаланып құрастыру мүмкін.

2.4. ПАРАЛЛЕЛЬ ҚОЗДЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЫ. ӨЗІН-ӨЗІ ҚОЗДЫРУ

Параллель қоздыру генераторын қосу сұлбасы. Параллель қоздырудың тұрақты ток генераторы тәуелсіз қоздыру генераторынан ерекшеленеді, оның қоздыру орамасы зәкірдің орамасына параллель қосылады (2.6, а - суретті қараңыз), демек, зәкірден қуат алады. Зәкірдің $I_{\text{я}}$ тогы, I жүктеме тогы және $I_{\text{в}}$ қоздыру тогы Кирхгофтың алғашқы заңымен байланысады:

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}, \text{ немесе } I = I_{\text{я}} - I_{\text{в}}. \quad (2.10)$$

Әрине, бос жүріс режимінде (XX), $I = 0$ және зәкір ток қоздыру тогына тең.

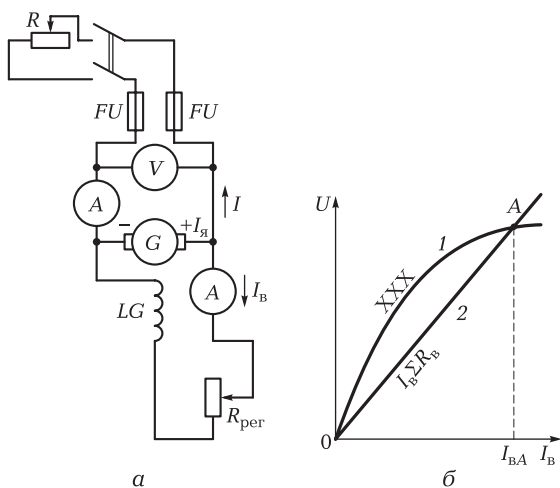
Қоздырудың параллель орамасын, сондай-ақ *шунттау орамасы* деп атайды (ағылшын *shunt* сөзі тармақталу, параллель тізбек). Параллель ораманың қысқыштары Ш₁ және Ш₂ деп белгіленеді.

Өзін-өзі қоздыру үдерісі. Генератор зәкірі айналмаған кезде қоздырушы орамада ток болмайды (қоздырушы ораманы ешқандай қуат көзі қуат бермейді). Дегенмен, айналмайтын генератордың магниттік жүйесі толығымен магнитсізденбейді; оның қалдық магнит өрісі бар. Қалдық өріс зәкір айналған сәтте *өзін-өзі қоздыру* үдерісін ықтимал етеді.

Өзін-өзі қоздыру үдерісі төменде келтірілген.

1. Қалдық магнит ағыны айналмалы зәкір орамасындағы $E_{\text{ост}}$ ЭҚК қалдықты ықпалдандырады (қалдық ЭҚК $U_{\text{ном}}$ генераторының номиналды кернеуінің 1...3% құрайды).

2. Қоздыру орамасы зәкірге қосылған, сондықтан $E_{\text{ост}}$ ЭҚК әрекетінде қоздыру орамасында $I_{\text{в}}$ ток $I_{\text{в}} = \frac{E_{\text{ост}}}{\sum R_{\text{в}}}$, өтеді, мұндағы $\sum R_{\text{в}}$ —



2.6.-сурет. Параллель қоздырудың тұрақты ток генераторы:
а — қосу сұлбасы; *б* — өзін-өзі қоздырудың үшінші шартын сипаттайтын кесте.

қоздыру орамасының кедергісін және реттеуші реостатының $R_{\text{пер}}$ кедергісін қамтитын қоздыру тізбегінің жалпы кедергісі.

3. Қоздыру орамасы арқылы өтіп жатқан I_B ток, машинаның негізгі магниттік ағынын арттырады, бұл өз кезегінде зәкір ЭҚК арттырады.

4. Зәкір ЭҚК ұлғаюы қоздыру токтың және магнит ағынның алдағы өсуіне әкеледі; машина қысқыштарындағы кернеу тұрақты күйге жеткенге дейін көшкін тәрізді артады.

Өзін-өзі қоздыру үрдісінің қалыпты үрдісі үшін келесі үш шарт орындалу керек.

Бірінші шарт. Машинаның қалдық магнит өрісі болуы керек.

Екінші шарт. Қоздыру орамасы, зәкірге магнит ағыны қалдық магнетизм ағымына сәйкес болатындай қосылу тиіс. Дұрыс қосылмаған жағдайда қалдық магнетизм ағыны қоздыру орамасының өріс ағынына қарсы бағытталады. Содан кейін машинаның негізгі магниттік ағыны көбейтілмейді, ал ЭҚК жоғарыламайды.

Үшінші шарт. Қоздыру орамасының тізбек кедергісі $\sum R_B$ белгілі шектік мәнінен кем болуы керек.

Осы шектік мән қалай анықталатынын анықтайық.

Негізгі және қалдық магниттік ағындардың бағыттары бірдей

болсын. Қоздыру тізбегінің қуат көзі генератордың өзі болғандықтан, қоздыру тізбегіндегі U_B кернеу генератордың зәкір қысқыштарындағы кернеу болып табылады. Ол генератордың ЭҚК зәкір тізбегіндегі кернеудің төмендеуімен ерекшеленеді, бірақ қоздыру тізбегінде үдерістерді қарастырғанда, U_B шамасын осы тізбектегі әрекет етуші көздің ЭҚК ретінде түсіндіре аламыз.

Өзін-өзі қоздыру үрдісінде, жоғарыда айтылғандай, қоздыру тогының жоғарылауы байқалады. Қоздыру шарғының ток өзгеруі өзіндік индукция құбылысымен бірге жүреді, бұл токтың лезде өзгеруіне жол бермейді. Бұл құбылысты сипаттайтын e_s өзіндік индукцияның ЭҚК қоздыру тогының өзгеру жылдамдығына сәйкес келеді (1.14-тармақты қараңыз):

$$e_s = -L_B \frac{dI_B}{dt},$$

мұндағы L_B қоздыру орамасының индуктивтілігі.

Қоздыру тізбегінде ток өткен кезде, $I_B \sum R_B$ кернеу осы кедергінің тізбегіне төмендейді.

Кирхгофтың екінші заңына сәйкес, контурда әрекет ететін ЭҚК алгебралық сомасы контур кедергісіне кернеудің төмендеу сомасына тең келеді. Онда қоздыру тізбегі үшін жазуга болады

$$U_B - L_B \frac{dI_B}{dt} = I_B \sum R_B.$$

Осыдан, қоздыру тогынан қоздыру тізбегінің кернеу тәуелділігін аламыз.

$$U_B = I_B \sum R_B + L_B \frac{dI_B}{dt}. \quad (2.11)$$

Генераторды іске қосу мен оның өзін-өзі қоздыру үдерісі, әдетте өшірілген жүктемеде орын алады. Параллель қоздыру генератордың қоздыру тізбегінің U_B кернеуі, сондай-ақ зәкір қысқыштарында U кернеуі болғандықтан, (2.11) теңдеуі XX сипаттамасын сипаттайды, яғни бос жүріс режимінде генератордың қысқыштарында қоздырушы токтан кернеудің тәуелділігін сипаттайды (2.6, б, суретті қараңыз I -сызық).

Қоздыру тогынан қоздыру тізбегінде кернеудің төмендеуіне тәуелділігі $\sum R_B$ қарсылық тұрақтылығына байланысты тікелей пропорционалдық кестесі арқылы көрсетіледі (2.6, б, суретті қараңыз 2-сы-

зык).

Осы қоздыру тогында қоздыру тізбегінің кернеуі $L_b \frac{dI_b}{dt}$, шамасына, теңдеуге (2.11) сәйкес, қоздыру тізбегінің кедергіде кернеудің азаюынан көп болады.

Сонымен, қоздыру тогының $L_b \frac{dI_b}{dt}$, әр мәні үшін 1 және 2-сызықтар арасындағы тік сызықпен берілген.

Кесіндінің ұзындығы нөлге тең болған A нүктесінде 1 және 2-сызықтардың қиылыстары, өзіндік индукцияның ЭҚК нөлге тең болады, яғни қоздыру тогының өзгеру жылдамдығы нөлге тең болады дегенді білдіреді $\frac{dI_b}{dt}$.

Басқа сөзбен айтқанда, A нүктесіне жеткен кезде I_b қоздыру тогы тұрақты болады. Осылайша, жоғарыда сипатталған өзін-өзі қоздыру үрдісінде қоздыру тогы нөлден I_{bA} мәніне дейін көтеріледі.

Егер, қоздыру тізбегінің кедергісі жоғарыласа, 2 түзу сызықтың көлбеулену бұрышы өседі. $\sum R_b$ шамасы белгілі бір мәнінде 2 түзу сызық 1 қисық сызыққа тән болады және қоздыру тогының барлық мәндері үшін (жанап өтетін нүктеден басқа) осы қисық үстінен орналасады. Қарсылықтың осы $\sum R_b$ мәні шектік $R_{кр}$ болады. Қоздыру тізбегінің кедергісі шектік кедергіден үлкен болса, өзін-өзі қоздыруға мүмкіндік болмайды. Жоғарыда берілген өзін-өзі қоздырудың үшінші шарты, осымен негізделген.

Генератордың параллель қоздырудың бос **жүріс сипаттамасы мен жүктемелік сипаттама** тәуелсіз генератордың тиісті қоздыру сипаттамаларына ұқсас болады (2.3, 2.4 - суреттерді қараңыз). Дегенмен, параллель қоздыру генераторында бұл сипаттамалар қоздыру тогының бір бағытымен ғана алынуы мүмкін, өйткені екінші өзін-өзі қоздыру шарты басқа бағытта орындалмайды.

Параллельді қоздыру **генераторының сыртқы сипаттамасы**, яғни оның қысқыштарында қоздыру тогы болмаған жағдайда 1 кернеу тогына U кернеуінің тәуелділігі генератордың тәуелсіз қоздырудың сыртқы сипаттамасымен салыстырғанда көлденең оське қатты иілген болады (2.5, a -суретті қараңыз).

Тәуелсіз кернеу генераторының қысқыштарында кернеудің төмендеуіне әсер ететін факторлар параллельді қоздыру генераторы жағдайында да жарамды болады. Параллельді қоздыру генератордың кернеуі азайған сайын, қоздыру тогы да азаяды, себебі оның қоздыру тізбегі тікелей зәкірден беріледі. Қоздыру тогының азаюы

полюстердің магниттік ағынын әлсіретеді, бұл машинаның ЭҚК төмендеуіне әкеліп соғады, сол себептен кернеудің одан да төмендеуіне әкеледі.

Жүктеме кедергісі азайғанда пайда болатын кернеу төмендеген сайын қоздыру тогы азаяды және магниттік ағын әлсірейді (машина магнитсіздендіріледі). Осылайша, I жүктеме тогы 2 - 2,5 есе $I_{\text{ном}}$ номиналды мәннен асатын мәнге ғана өседі. Жүктеме кедергісі кейін төмендегенде жүктеме тогы төмендейді: жүктеме токтарының өзгеруіне әсер ететін басым фактор жүктеме кедергісінің төмендеуі емес, генератордың қысқыштарында кернеудің төмендеуі болып табылады. Жүктеме кернеуін нөлге дейін төмендеткенде (қысқа тұйықталу режимі) қоздыру тізбегі қуат алмайды және қоздыру тогы нөлге тең болады. Бұл жағдайда жүктеме тогы номиналды токтан төмен болатын $I_{k2} = E_{\text{ост}}/R_{\text{я}}$ мәнін қабылдайды. Бірақ, кенеттен қысқа тұйықталу жағдайында машина тез арада магнитсіздендірілмейді және қысқа тұйықталу тогы машина үшін қауіпті мәніне жетеді. Білектенде маңызды тежеу сәті болады, ал коллекторда дөңгелек отқа айналатын күшті ұшқын пайда болады.

Реттемелік сипаттамасы – U генератор кернеуінің тұрақты мәндерін қолданатын I жүктеме тогынан $I_{\text{в}}$ қоздыру тогының және n зәкірдің айналу жиілігіне тәуелділігі, параллель қоздыру генератордың тәуелсіз қоздыру генератордың реттемелік сипаттамасына ұқсас түрі болады (2.5, б-суретті қараңыз). Әрине, (2.9) теңдеумен анықталатын сипаттамасының өсуі параллель қоздыру генераторында үлкенірек болады, өйткені мұндай генератордағы реттеу болмаған кезде кернеудің төмендеуі маңыздырақ болады (2.5а-суретті қараңыз) және берілген ток жүктемесінде кернеуді тұрақты деңгейде сақтау үшін үлкен қоздыру тогы талап етіледі.

Енді 2.3 және 2.4 - бөлімдерді қорытындылайық. Параллель қоздыру генераторының қоздыру орамасын қуат беру үшін бөлек қуат көзін талап етпейтін артықшылығы бар. Қысқыштарда кернеуді кең реттеу мүмкіндіктері тәуелсіз қоздыру генераторының артықшылығы болып табылады.

2.5. ЖҮЙЕЛІ ЖӘНЕ АРАЛАС ҚОЗДЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЛАРЫ

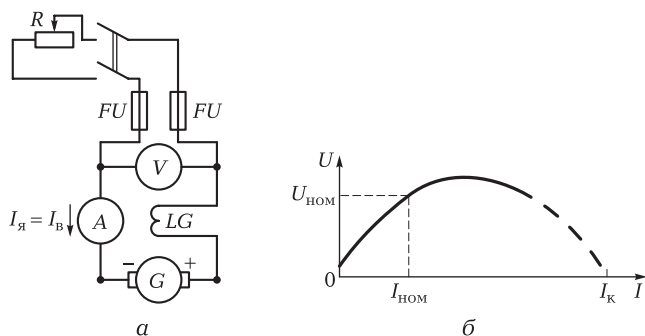
Жүйелі қоздыру генераторы. Генераторда магниттік токтың өзін-өзі қоздыру үдерісі тек қана параллельді ғана емес, сонымен қатар қоздыру орамасының жүйелі қосылуында да орын алады (2.7 а –суретті қараңыз). Бұл жағдайда $I_{\text{я}}$ зәкір тогы бір уақытта I жүктеменің және $I_{\text{в}}$ қоздыру тогы болып табылады.

Жүйелі ораманы, сондай-ақ *сериялық* деп те атайды (ағылшын *series* - жүйелі). Жүйелі ораманың қысқаштарын C_1 және C_2 деп белгілейді.

ХХ режимінде жүйелі қоздыру генераторының қоздыру тогы нөлге тең, сондықтан осы генератор үшін $E(I_{\text{в}})$ бос жүріс сипаттамасын құру мүмкін емес. Реттемелік сипаттамасы, яғни, тұрақты кернеуде $I_{\text{в}}(I)$ тәуелділігі де құрылмайды, өйткені қоздыру тогы кернеудің тогымен сәйкес келеді. $U(I_{\text{в}})$ жүктеме сипаттамасын құру үшін, тұрақты жүктеме тогын ұстап тұру керек, оны да жасау сол себепті мүмкін емес.

Жоғарыда айтылғаннан жүйелі қоздыру генераторының қасиеттері $U(I)$ сыртқы сипаттамасымен анықталатынын анықтауға болады.

Жүктеме тізбегінің қосқышын жауып, жүктеме кедергісін төмендетумен біз ең алдымен кернеудің артуын ұлғайта отырып, кернеудің сызықты көтерілуін анықтаймыз, өйткені осы ток, қоздыру тогы болады, ал генератордың магниттік жүйесі төмен ағымдарда қанықтырылмайды (2.7 б-сурет).



2.7.-сурет. Жүйелі қоздырудың тұрақты ток генераторы:
а — қосылу сұлбасы; б — сыртқы сипаттама

Токтың келесі ұлғаюында магниттік жүйенің қанықтылығы артады, ал кернеудің өсу қарқыны азаяды. Кернеу белгілі бір максималды мәнге дейін артады, одан кейін токтың келесі артуы төмендей бастайды. Сыртқы сипаттаманың осы тәртібі болаттың қанықтыруымен қатар, зәкір реакциясының магнитсиздендіру әрекетін және зәкір тізбегінің кедергісінде кернеудің төмендеуін қамтамасыз етеді, яғни бұрын сипатталған екі қоздыру жүйесіндегі генераторлардың жұмысында пайда болатын факторларды тудырады. Қысқа тұйықталу (ҚТ/КЗ-қысқа тұйықталу) жағдайында, генератордағы кернеу нөлге тең болғанда, ток номиналды шамасынан жоғары мәнге ие болады.

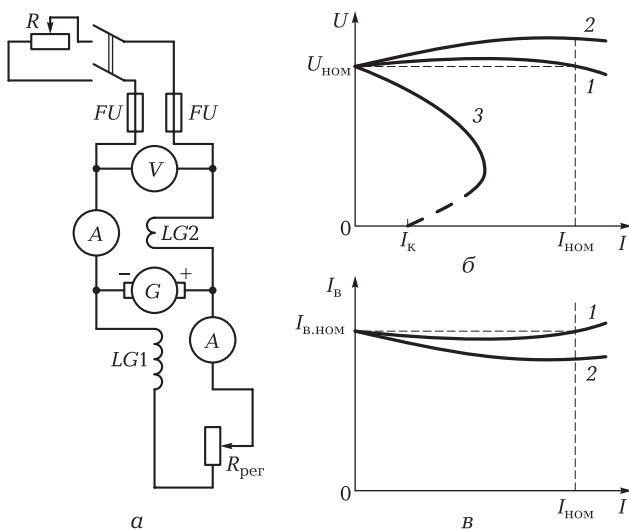
Жүйелік қоздыру генераторының қысқыштарындағы кернеу жүктеме тогы өзгерген кезде айтарлықтай өзгереді және сол сәтте кернеуді тұрақты деңгейде ұстап тұру мүмкіндігі болмағандықтан (себебі қоздыру тогы бір уақытта жүктеме тогы болып табылады), мұндай *генераторлар практикалық қолдану* таппады. Бірақ, жүйелі қоздыру ерекшеліктері аралас қоздыру генераторларында қолданылады.

Аралас қоздырғыш генераторы параллельді және жүйелі қоздыру генераторларының қасиеттерін біріктіреді. Генераторларды қоздырудың тағы бір атауы – ол *компаунд-қоздыру* (ағылшын-*compound* сөзінен - араластыру, қосу, біріктіру). Алдын біз, параллель қоздыру кезінде генератордың кернеуі жүктеме тогы жоғарылаған сәтте азаятынын, ал жүйелік жүктеме кезінде ұлғаятынын тапын білдік (жүктеме бойынша номиналдықтан аса ерекшеленбейді).

Осындай жағдайда, бір уақытта қарастырылған екі қоздыру орамаларын қолдануға болады (2.8 а - сурет), сол себепті жүйелі орамалардың орамдар санын жүктеменің өзгеруімен кернеу аз өзгертіндей етіп таңдау қажет. Мысалы, номиналды ток бойынша $U_{ном}$ кернеуі бос жүріс кезінде U_0 кернеуіне тең болатындай жағдайға жетуге болады (2.8, б-сурет, 1 - қисық сызық). Токтың аралық мәндерінде кернеу, параллельді және тіпті тәуелсіз қоздырудан гөрі, U_0 кернеуінен әлдеқайда аз дәрежеде ерекшеленеді.

Жүйелік қоздыру орамасының орамдар санын көбейту арқылы (жүйелі орамаларды күшейтіп) бос жүріске (2 - қисық сызық) қарағанда, номиналды ток кезінде жоғары кернеуді алуға болады, осылайша желі өткізгіштерінде кернеудің төмендеуін өтеуге болады. Мұндай жағдайда генератордың *тым артық қозуы* туралы айтылады.

Егер, жүйелі қоздыру орамасының қосу нүктелерінің орындарын



2.8.-сурет. Аралас қоздырудың тұрақты ток генераторы:

a — қосу сұлбасы; *б* — сыртқы сипаттамалар; *в* — реттемелік сипаттамалары; 1 — қалыпты қоздыру; 2 — тым аса қоздыру; 3 — орамалардың қарсы қосылуы

ауыстырса, онда ол параллель орамамен жасалған өрісте магнитсіздендіру әрекетін береді. Сыртқы сипаттамалары кенет төмендейтін, ал қысқа тұйықталу тогы азаятын болады (3 қисық сызық). Орамалардың қарсы қосылуы дәнекерлеуші генераторларда қолданылады, оның қысқа тұйықталу режимі норма болып табылады.

Аралас және параллель қоздыру генераторларының *жүктемелік сипаттамалары* түрлері бойынша бірдей болады, алайда, жүйелік орамалардың (күшті жүйелі орамада) орамдар саны үлкен болған жағдайда, аралас қоздыру генераторының жүктемелік сипаттамалары оның бос жүріс сипаттамаларынан жоғары орналасуы мүмкін.

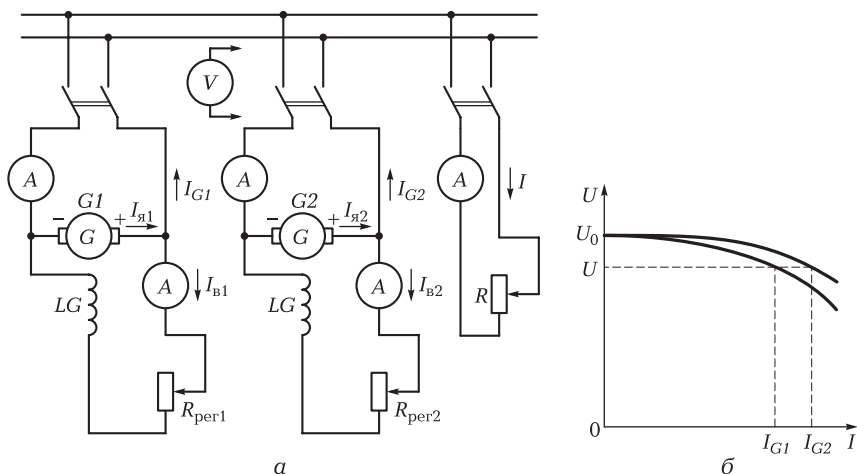
Аралас қоздыру генераторының реттемелік сипаттамаларын алып тастағанда тұрақты кернеу мәні параллельді қоздыру тізбегіне енгізілген реттемелік реостат арқылы қолданылады. Реттемелік сипаттамалардың түрі 2.8, в – суретте көрсетілген. Жүйелі қоздырудың күшейтілген орама жағдайында кернеудің тұрақтылығы жүктеме тогы өзгерген кезде, қалыпты қоздыру жағдайына қарағанда параллельді тізбектегі кіші токпен (2 қисық сызық) жеткізіледі.

Параллельді қоздыру генераторларын параллельді жұмысына қосу шарттары. Генератордың қуаты, оның электр қуат қабылдағыштарының қуатына сәйкес келуі керек. Қабылдағыштардың айтарлықтай қуаты болған жағдайда, генераторлардың бір уақытта (параллельді) жұмыс істеу қажеттілігі туындайды. Егер, уақыт өткен сайын қуаттың тұтынуы өзгерсе, онда кейбір генераторларды желіге қосу керек немесе желіден ажырату керек. Сайып келгенде, жеке генераторды жөндеу үшін, оның жүктемесін басқа генераторларға ауыстырып, ортақ желі жұмысынан шығарып тастау керек.

Параллельді жұмысқа қосу шарттарын екі параллельді қоздыру генераторларын пайдалану арқылы қарастырайық (2.9 а -сурет).

Мысалы, $G1$ генераторы жалпы шинаға қосылған және I_{G1} токпен жүктелген болсын. Шиналардағы кернеу U -ге тең. $G2$ генераторының параллель жұмысына, желінің жұмыс режимі бұзылмайтындай етіп қосылу тиіс, яғни генераторды қосқан кезде желіде үлкен ток ағындары болмай, шиналарда кернеу бірдей болып қалу қажет. Ол үшін келесі екі шарт орындалу керек.

Алғашқы шарт. ЭҚК E_{G2} қосылатын $G2$ генератордың U



2.9.-сурет. Параллель қоздыру генераторларының параллельді жұмысы:
а — қосу сұлбасы, б — генераторлар арасында тоқты тарату

желісінің кернеуіне тең болуы тиіс (осы жағдайда желі кернеуі бірінші генератордың шықпасындағы кернеуге тең болады). Бұл жағдайда, қосылатын генератордың желіге қосылғаннан кейінгі ток жүктемесі нөлге тең болады, яғни бұл генератор желіге қуат бермейді және оны желіден жұмсамайды. $E_{G2} = U$ теңдігіне жету үшін, қосылған генератордың I_{B2} қоздыру тогын реттеу арқылы қол жеткізуге болады.

Егер, параллельді жұмысқа қосылған екі генератор қосылу сәтінде *бос жүріс режимінде* болса, онда бірінші шара генераторлардың ЭҚК теңдігіне саяды: $E_{G1} = E_{G2}$.

Екінші шарт. Қосылған $G2$ генераторының полярлығы $G1$ генераторының полярлығына сәйкес болуы керек (жалпы жағдайда - желінің полярлығына). Бұл, «+» полярлығы бар $G1$ генераторының шығысына, сол полярлықтағы $G2$ генератордың шықпасына қосылу керек. Осы шарт сақталмаған жағдайда, біз екі генератордың жүйелі қосылыстары бар тізбегін аламыз.

Бұл тізбекте, өте аз кедергісі бар, генераторлардың жалпы ЭҚК әрекет етеді. Сонымен қатар, ток жарамайтын мәнге жетеді, ол коллаторлар арқылы дөңгелек өрт тудырып және генераторларды жою мүмкін.

Генераторларды параллель жұмысқа қосу үшін белгіленген екі шартты сақтау тұрақты кернеу вольтметрмен тексеріледі. Вольтметр қосылатын генератор шықпаларының біреумен, жүктемеге жұмыс істейтін генератордың аттас шықпасымен қосылу керек. Егер вольтметр нөлдік көрсеткішті көрсетсе, онда жоғарыда аталған шарттар орындалады.

Жүктемені бір генератордан екіншісіне ауыстыру. Мысалы, $G1$ генераторы жүктемеге жұмыс істейді деп есептейік. $G2$ генераторы $G1$ генераторымен параллельді жұмыс істеу үшін қосылғанда (қосу шарттарын сақтаумен) $G2$ генераторының жүктемесі нөлге тең болады. $G1$ генераторынан $G2$ генераторына жүктемені жартылай ауыстыру қажет болсын. Бұл жағдайда U кернеуін жалпы шинада өзгеріссіз қалдыру қажет.

Бұл тапсырманы қалай шешу керектігін анықтап көрейік. Генераторлардың жалпы кернеуін олардың ЭҚК арқылы және олардың кедергісіндегі кернеудің төмендеуін көрсетейік:

$$U = E_{G1} - I_{G1} R_{G1}; \quad U = E_{G2} - E_{G2} R_{G2},$$

мұндағы R_{G1} шықпалар арасындағы $G1$ генераторының қарсылығы, яғни зәкір тізбегінің және генераторлық өріс орамасы тізбегінің параллель қосылыстарының кедергісі; R_{G2} ол да $G2$ генераторы

үшін.

Енді жазылған теңдеулерден генераторлардың жүктемелік токтарын көрсетейік:

$$I_{G1} = \frac{E_{G1} - U}{R_{G1}}; \quad I_{G2} = \frac{E_{G2} - U}{R_{G2}}. \quad (2.12)$$

Теңдеулерден (2.12) генераторлардың жүктеме токтарын өзгерту үшін олардың E_{G1} және E_{G2} ЭҚК өзгерту қажет. ЭҚК, өз кезегінде, I_{B1} және I_{B2} қоздыру тогын өзгерту арқылы реттеледі. Генератордың жүктемесін арттыру үшін, осы генератордың қоздыру тогын ұлғайту арқылы оның ЭҚК күшейту керек. Жүктеменің бір бөлігін $G1$ генераторынан $G2$ генераторына өткізу үшін I_{B2} қоздыру тогын арттыру қажет. U кернеуінің тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін I_{B1} қоздыру тогын бір уақытта азайту керек.

Егер біз жүктемеден босатылған генератордың қоздыру тогын азайта берсек және жүктелетін қоздыру тогын көбейтсек, онда жүктемеден босатылған генератор қозғалтқыштың режиміне өтеді. Осы генератордың жүктеме тогы аталған жағдайда бағытты керісінше өзгертеді.

Параллельді жұмыс істейтін генераторлар арасындағы жүктемені бөлу. Параллельді жұмыс істеу үшін қосылатын генераторлар әртүрлі сыртқы сипаттамаларға ие болуы мүмкін, бұл зәкір орамаларының және қосымша полюстердің кедергі мәндеріндегі айырмашылықтармен, зәкірдің тең емес реакциясы мен машиналардың магниттік жүйелерінің теңсіздігімен түсіндіріледі.

Бір координаталық жазықтыққа салынған генераторлардың сыртқы сипаттамалары бойынша, параллель жұмыс істеу үшін қосқанда генераторлар арасындағы жүктеменің қалай бөлінетінін қарастыруға болады. Параллельді жұмыста (шиналардағы берілген кернеуде) неғұрлым қатаң (жайпақ) сыртқы сипаттамаға ие генератор жұмсақ сипаттамасы бар генераторға қарағанда көбірек жүктелінетінін байқауға болады (2.9 б - суретті қараңыз).

Параллельді жұмыс істеу үшін генераторлар сыртқы сипаттамаларға сәйкес болу керек. Сәйкес келмейтін сипаттамалар жағдайында, токтардың біркелкі емес таратылуы қоздыру тогын реттеу арқылы түзетілуі мүмкін.

Аралас қоздыру генераторларының параллельді жұмысы. Екі аралас қоздыру генераторы (2.8, а - суретті қараңыз.) параллель қоздыру генераторлары сияқты параллель жұмысқа дәл сол сұлба бойынша іске қосылған деп есептейік (2.9 а -суретті қараңыз). Егер

бірінші генератордың I_{G1} тогы қандай да бір себептермен жоғарыласа, онда жүйелі қоздыру орамасының магниттік ағыны жоғарылайды, бірінші генератордың ЭҚК өседі, ал магнит өрісі артады. Бұл I_{G1} тогының одан да артуына алып келеді. $G1$ генераторының жүктелуі $G2$ генераторының жүктемеден босатылуымен бірге бір уақытта жасалады. Осылайша, осы сұлбаға енгізілген аралас қоздыру генераторларының параллельді жұмыс жасай алмауы мүмкін. Параллельді жұмыс тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін, зәкірлердің аттас қысқыштарымен қосылған генераторлардың жүйелі орамаларының қысқыштар арасында теңдестіруші сымды қосу қажет. Бұл жағдайда генераторлардың бірінің тогының кездейсоқ жоғарылауы барлық параллельді қосылатын генераторлардың жүйелі орамалары арасында бөлінеді және олардың бірлескен жұмысы қалыпты түрде жалғасады.

2.7. ТҰРАҚТЫ ТОК ГЕНЕРАТОРЛАРДЫҢ АРНАЙЫ ТҮРЛЕРІ

Электрмашиналық күшейткіш (ЭМК) генератор режимінде жұмыс істейтін және электр сигналдарын күшейтетін электр машинасы. Электрмашиналық күшейткіштер автоматтандырылған реттеу және басқару жүйелерінде, әсіресе салыстырмалы қуатты басқарушы электр қозғалтқыштарын, сондай-ақ әртүрлі электр жетектері үшін қосалқы машиналар ретінде қолданылады. ЭМК төмен қуатты өзгерту арқылы үлкен қуаттарды бақылауды қамтамасыз етеді.

Қарапайым ЭМК *тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторы* болып табылады (2.3-бөлімін қараңыз): қоздыру тогын өзгерту арқылы генератордың қысқыштарында кернеуді бақылауға болады. Осылайша, қоздыру орамасының тізбегіндегі салыстырмалы төмен қуат, зәкір тізбегіндегі үлкен қуатты басқарады. Бұл ретте, жетек қозғалтқыш энергияның көзі болады. (Салыстыру үшін: электронды транзисторлық күшейткіштерде ауыспалы төмен қуатты сигнал, коллекторлық тізбектегі тұрақты токтың көзінен энергия енуін бақылайды.)

Қуатты күшейту коэффициенті (күшейткіштің шығу қуатын қоздыру орамасының кірісінде қуатқа қатынасы) тәуелсіз генераторларда 100 мәніне жетеді.

Күшейту коэффициенті, бірінші генератордың шығыс кернеуі (зәкір кернеуі) екіншісінің қоздыру орамасына берілгенде, гене-

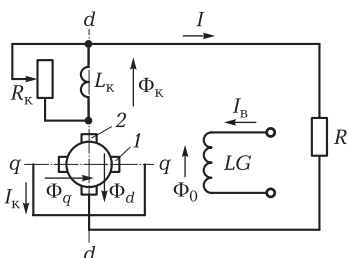
ратордың *каскадтық қосу тізбегі* арқылы ұлғайтылу мүмкін. Бұл жағдайда, екінші генератордың шығуындағы қуаты, бірінші генератордың кірісіндегі (қоздыру орамасында) қуатын 1000 және одан көп есеге асуы мүмкін. Алайда, каскадтық сұлба қымбат және өте үлкен болады.

Күшейту коэффициенті 1000-нан 10 000-ға дейін жететін *көлденең өрістің* ЭМК жиі қолданылады. Оның жұмысын сипаттамас бұрын, машинаның нәтижелік магнит өрісіне зәкір өрісінің әсеріне байланысты тұрақты ток машинасында зәкір реакциясы орын алатынын еске түсірейік. Зәкір тогының магниттік өрісі негізгі полюстің осіне перпендикуляр болады (1.12 *a* -суретті қараңыз), сондықтан 1.6-бөлімде қарастырылған зәкір реакциясы *көлденең* деп аталады. Қарапайым тұрақты ток машинасында ол полюстер өрісін бұрмалайды және коммутацияны бұзады, сондықтан зәкір реакциясын әлсірету үшін шаралар қолданылады (1.8 - бөлімін қараңыз).

Кәдімгі машинаға қарағанда электрмеханикалық көлденең өріс күшейткішінде *зәкір реакциясы ЭҚК алу мақсатында* қолданылады. Көлденең *qq* осьте орналасқан көлденең щеткалар 1 (2.10-сурет) қысқа тұйықталған. Көлденең щеткалардан басқа, ЭМК-нің көлденең *dd* осьте, яғни полюстердің осьтерінде орнатылған тік щеткалары бар.

Тәуелсіз жұмыс істейтін көзде I_b ток *LG* қоздыру (басқару) орамасында ағып тұрады. Бұл ток Φ_0 магнит ағынын жасайды. Жетек қозғалтқыштың зәкірі бұрылса магнит ағыны ЭҚК зәкір орамасында индукцияланады. ЭҚК әсерінен, зәкір орамасында көлденең щеткалар тұйықталғандықтан I_k қысқа тұйықталу ток пайда болады. Қысқа тұйықталу тогы шағын Φ_0 магнит ағыны үшін де маңызды болады.

Полюстің осіне перпендикулярлы бағытталған I_k тогы, зәкір реакциясының Φ_q көлденең ағынын жасайды. Зәкір орамасында осы ағынның әсерінен, 2 тік щеткалар арасында өткізілген ЭҚК турала-



2.10.-сурет. Көлденең ағымы бар электрмашина күшейткішінің электрлік сұлбасы:

I – көлденең щеткалар; 2 – тік щеткалар

нады. Егер осы щеткаларға жүктемені қоссақ, оның бойымен I тогы ағады.

Жүктеменің I тогы, Φ_d зәкір реакциясының бойлық ағынын жасайды. Бұл ағым басқару орамасынан құрылған Φ_0 ағынына қарсы бағытталған. Осылайша, Φ_d ағымы машинаны магнитсіздендіреді. Бойлық ағынның магнитсіздендіру әсерін өтеу үшін, тұғырға L_k өтемдеуші ораманы, Φ_d ағынына қарсы бағытталған Φ_k ағынын орнатады. Өтемді реттеу үшін, өтемдеуші ораманы R_k реостатымен тұйықтайды.

Жүктеме ток өтетін 2 тік щеткалар үстінен коммутация жағдайларын жақсарту үшін, қосымша полюстер орнатылады.

Тұрақты ток тахогенераторлары, машина біліктерін айналу жылдамдығын өлшеуге арналған. Олар, сондай-ақ *айналу жылдамдығына пропорционалды кернеуін* өндіріп, автоматты басқару жүйелерінде қолданылады.

Тахогенератор - тәуелсіз қоздыруы немесе тұрақты магниттен қоздыруы бар, төмен қуат генераторы.

Тендеуге сәйкес, генераторымен өндірілетін E ЭҚК (2.7), егер Φ машинасының магниттік ағыны тұрақты мәнге ие болса n айналу жылдамдығына пропорционалды болады. Соңғы шарт тұрақты қоздыру кезінде, сондай-ақ тұрақты магниттен қоздыру кезінде орындалады.

Тахогенератор білігін, айналу жиілігі өлшенетін машинаның білігіне механикалық түрде қосады. Тахометрдің қысқыштарына қосылған айтарлықтай ішкі кедергісі бар вольтметр, ЭҚК тахогенераторына тең болатын кернеуді өлшейді. Егер вольтметрдің шкаласын жиілік мәндеріне бөлсек, біз *тахометр* аламыз. Тахометр бағытталмалық немесе сандық болуы мүмкін.

Дәнекерлеуші генератор. Бұрын, жүйелік және параллель қоздыру орамаларын кері қосумен аралас қоздыру генераторы электрдәнекерлеу мақсатта қолданылғаны байқалған болатын, өйткені күрт төмен түсетін сыртқы сипаттамасы мен қысқа тұйықталудың төмен тогы бар (2.5-бөлімін қараңыз).

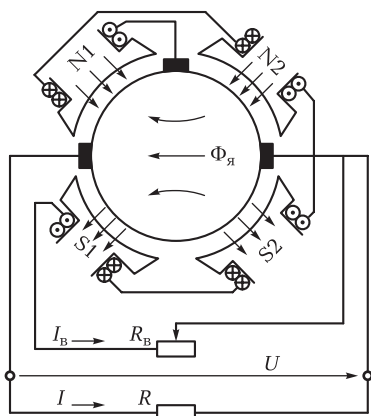
Арнайы дәнекерлеу генераторының конструкциясы, күрт түсетін сыртқы сипаттамасын, яғни ток жүктемесі жоғарылағанда кернеудің жылдам азаюын қарастырады. Осы идея, зәкір тогының өсуімен машинаның магнитті өрісін төмендететін зәкір реакциясын табу болатын.

Дәнекерлеу генераторының құрылымдық ерекшелігі, әрбір полюс

екі ішінара полюстерден тұратын, ажыратылған полюстер болып табылады: солтүстік полюс N1 және N2 ішінара полюстерден, ал оңтүстік полюс S1 және S2 ішінара полюстерден тұрады (2.11-сурет). Дәнекерлеу генераторында үш щеткалар жинағы орнатылған. Негізгі (көлденең) щеткаларға R жүктемесі қосылған. Қоздыру орамасы қосымша (жоғарғы) щеткадан басталады, барлық полюстерді қамтиды және негізгі (оң жақта) щеткалардың бірінде аяқталады. Орама бағыты суретте көрсетілген полюстер полярлығына сәйкес таңдалады.

Дәнекерлеу генераторының әр ажыратылған полюсінің ішінара полюстерінің әртүрлі көлденең қимасы болғаны маңызды. N1 және S1 ішінара полюстерінің үлкейтілген көлденең қимасы бар, сондықтан олар нашар қаныққан (бұл полюстер ағыны үлкен аймаққа бөлінеді және олардың магниттік индукциясы шағын). Керісінше, N2 және S2 полюстерінің кішірейтілген көлденең қимасы бар, сондықтан олардың қанықтылығы үлкен. Генератор жүктемеде жұмыс істегенде, зәкір тогы N1 және S1 ішінара полюстерінің өрісіне қарсы және N2 және S2 ішінара полюстерінің өрісіне сәйкес келетін бағыты таңдалған $\Phi_{\text{я}}$ магниттік ағынды тудырады. Осы себепті N1 және S1 нашар қаныққан полюстер өрісі айтарлықтай әлсірейді (бос жүріс режимімен салыстырғанда), ал N2 және S2 полюстер өрісі осы полюстердің күшті қанықтылығына байланысты аса өзгермейді.

Нәтижесінде жүктеме тогы жоғарылағанда, аттас полюстердің жалпы ағыны едәуір төмендейді, сондықтан генератор қысқыштарындағы I жүктемелік тогынан U кернеуінің тәуелділігі, яғни сыртқы сипаттамасы, қысқа тұйықталу тогы бар нүктеде, ток осьті



2.11.-сурет. Дәнекерлеу генераторының электрикалық сұлбасы

қиып өтетін құлама қисық болып табылады .

Дәнекерлеу тогының мәні (қысқа тұйықталу тогының) қоздыру тізбегінде $R_{\text{в}}$ реостат көмегімен орнатылады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Тұрақты ток генераторында қандай шығындар бар? Генератордың электрмагнитті қуаты, тұтынатын механикалық қуатымен қалай байланысады?
2. Генератордың ЭҚК қандай параметрлерге тәуелді болады?
3. Генераторды тәуелсіз қоздыру қандай жағдайларда қолданылады?
4. Генератордың бос жүріс сипаттамасы нені қамтиды? Осы сипаттаманың ерекшеліктерін түсіндіріңіз.
5. Жүктемелік сипаттама деген не? Бос жүріс сипаттамасына қатысты оның орналасуын түсіндіріңіз.
6. Генератордың сыртқы сипаттамасы нені көрсетеді? Оны қандай тәсілмен алады? Тәуелсіз қоздыру кезінде ток жүктемесі өзгерген кезде генератордың қысқыштарында кернеудің өзгеру себептерін түсіндіріңіз?
7. Генератордың реттеу сипаттамасын қандай мақсатпен алады? Бұл сипаттама нені көрсетеді?
8. Тұрақты ток генераторының өзін-өзі қоздыру үдерісін түсіндіріңіз және өзін-өзі қоздыру шарттарын атаңыз.
9. Тәуелсіз қоздырудың тиісті сипаттамаларынан параллельді қоздыру генератордың сыртқы және реттемелік сипаттамаларынан айырмашылығы қандай? Ол айырмашылықтардың себептері қандай?
10. Жүйелі қоздырудың тұрақты ток генератордың ерекшеліктері қандай? Осындай генераторлар іс жүзінде неге қолданылмайды?
11. Аралас генератордың параллельді қоздыру генераторынан артықшылығы неде?
12. Параллельді жұмысқа параллельді қоздырудың тұрақты ток генераторларын қосу үшін қандай шарттарын орындау керек?
13. Параллельді жұмыс істейтін генераторлар арасында жүктемені қалай қайта бөлуге болады? Параллельді жұмыс істейтін генераторлардың біреуін қозғалтқыш режиміне қалай ауыстыруға болады?
14. Аралас қоздыру генераторлардың параллельді жұмыс ерекшелігі қандай?

ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫ

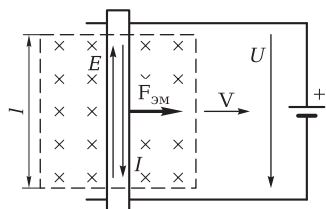
3.1. ТҰРАҚТЫ ТОК ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШ ӨРЕКЕТІНІҢ ҚАҒИДАСЫ

Біртекті магнит өрісіндегі өткізгіш. Магнит өрісінде сыртқы күшпен ауыстырылған өткізгіште болып жатқан құбылыстар 1.1 – бөлімде қарастырылған (1.1-суретті қараңыз). Өткізгіште ЭҚК пайда болады, ал егер өткізгіш жүктемеге тұйықталған болса, онда оның бойымен ток өтеді. Бұл жағдайда сыртқы күшке қарсы бағытталған электромагниттік күш пайда болады. Қарастырылып отырған өткізгіштегі электр энергиясының генерациясы сыртқы күштің жұмысына байланысты болады деген қорытынды жасалынды.

Енді тәжірибенің параметрлерін өзгертеміз: біз бұрынғыдай біртекті магнит өрісіне қойылған өткізгішті жүктемеге емес, тұрақты U кернеу көзіне қосамыз. Өткізгіш бойымен, бағыты кернеу көзін қосу полярлығымен анықталатын I ток жүреді (3-сурет).). Сыртқы күшті жоямыз.

Магнит өрісінің B индукциясына, I өткізгіштің белсенді ұзындығына және l теңдеуге (1.2) сәйкес, магнит өрісіне орналастырылған тогымен өткізгішке электромагниттік $F_{эм}$ күші (ампер күші) әсер етеді. Электромагниттік күштің бағыты сол қол ережесімен анықталады.

Қарастырылып отырған өткізгіш, $F_{эм}$ күшінің әсерінен параллель бағыттаушы сымдар бойымен оңға қарай жылжиды. Бірақ, қозғалып жатқан магнит өрісінде, бағыты оң қол ережесімен анықталатын E



3.1.-сурет. Қозғалтқыш әрекеті қағидасының көрінісі.

ЭҚК тураланады. Бұл бағыт, кернеу көзімен жасалған ток бағытына қарама-қарсы келеді, сондықтан осындай ЭҚК қарсы ЭҚК деп аталады.

Сонымен, *механикалық жұмыс электр энергиясының есебінен жүзеге асырылады* (қарсы ЭҚК асатын қуат көзі қажет).

Осында қарастырылған үлгінің және 1.1-бөлімде қарастырылған үлгінің маңызды ерекшеліктерін атап өтеміз. Магнит өрісінде орналасқан, сол бір өткізгіш генератордың рөлін (егер ол сыртқы күшпен қозғалса) немесе қозғалтқыштың рөлін (егер ол арқылы ток өткізілетін болса) атқарады. Бұл ерекшелік электр генераторлары мен қозғалтқыштарының барлық түрлеріне жалпылануы мүмкін: *кез келген электр машинасы генератор режимінде де, қозғалтқыш режимінде де жұмыс істей алады. Бұл қасиет электр машиналарының қалпына келу қасиеті* деп аталады.

Қозғалтқышты теңдестіру. Сыртқы көзден кернеу берілген магниттік өрісте өткізгішпен байланысты ойымызды жалғастырайық. Қарастырылып отырған өткізгіш тізбегі қарама-қарсы қосылған екі көзі бар, орнын басу үлгісі ретінде суреттелу мүмкін: U кернеумен қуат беру көзі және қарсы E ЭҚК көзі.

Кирхгофтың екінші заңына сәйкес, электр тізбегінде әрекет ететін ЭҚК алгебралық сомасы контур қарсылықтарда кернеудің азаюларының алгебралық сомасына тең болады. Магнит өрісіндегі өткізгіштен және қуат көзінен тұратын тізбекті алу үшін біз келесіні аламыз:

$$U - E = IR,$$

мұндағы R — өткізгіш кедергісі.

Теңдеуді жазған кезде, ЭҚК көзі мінсіз болса, қуат көзінің ЭҚК U -кернеуіне тең жағдайы ескеріледі. Егер көздің нөлден тыс ішкі қарсылығы болса, онда U шамасында ішкі қарсылықтағы кернеудің төмендеуі ескеріледі (теңдеуді жазғанда осы амал көздің қасиеттеріне қызығушылық туындамаған кезде Кирхгофтың екінші заңына сәйкес пайдаланылады. Осыған ұқсас пікірлер, теңдеуді жазу кезінде 2.4-бөлімде – қолданылған (2.11)).

Параллельді жолдардың кедергісі қарастырылып отырған сымның кедергісімен салыстырғанда аз шамада қабылданады. Егер бұл шарт сақталмаса, жеткізілген сымдарының қарсылығы R мәнінде ескерілу мүмкін.

Жазылған теңдеуден қуат кернеуін білдірейік:

$$U = E + IR. \quad (3.1)$$

Зәкір кедергісіндегі төмендеу шамасына индукциялайтын қарсы ЭҚК қозғалтқыш қуат көзінің кернеуі үлкен екендігін көрсететін қозғалтқыш теңдеуі жасалынды. Генератордың теңдеуіне өту үшін кернеу мен ЭҚК орындарын ауыстыру қажет (2.4):

$$UR = E - IR \quad (3.1)$$

(генератордың кернеуі индукцияланған ЭҚК қарағанда аз болады).

Электротехника курсына соңғы жазылған теңдеу (және (2.4) теңдеуі) генераторлық режимде жұмыс істейтін көздің теңдеуі болып есептеледі, оның тогы ЭҚК сияқты бағытына бағытталған. Тогы ЭҚК бағытына қарама-қарсы болатын теңдеу (3.1) қозғалтқыш режимінде жұмыс істейтін көздің теңдеуі болып қарастырылады.

Теңдеудің екі жағын да (3.1) өткізгіш тогына (зәкір тогы) көбейтеміз I :

$$UI = EI + I^2 R. \quad (3.2)$$

Енді E индукцияның ЭҚК оның Blv өрнегіне формулаға сәйкес ауыстырамыз (1.1).

(қарастырылып жатқан генератор немесе қозғалтқыш режимдеріне қарамастан ЭҚК магнит өрісінің индукциясына, өткізгіш қозғалысының белсенді ұзындығына және жылдамдығына пропорционалды болады):

$$UI = BlvI + I^2 R.$$

Blv көбейтіндісі $F_{эм}$ электромагнитті күшін (1.2) формулаға сәйкес береді, сондықтан

$$UI = F_{эм} v + I^2 R. \quad (3.3)$$

(3.3) өрнекте көрсетілгендей, UI -ге тең қуат көзінің электр қуаты, қозғалтқышта $F_3 v$ тең механикалық қуатқа айналады және Джоуль — Ленц заңына сәйкес, анықталатын $I^2 R$ жылу шығындарына жұмсалады. Генератордың жағдайында болғандай, $F_3 v$ қозғалтқышының механикалық қуаты электромагнитті EI қуатына тең болады (сонымен бірге (1.5) өрнекті қараңыз). Дегенмен, генераторға қарағанда, қозғалтқышта электромагнитті қуат механикалық түрге айналады.

Тұрақты ток қозғалтқышының үлгісі. Тұрақты ток генераторының үлгісі 1.1 -бөлімде сипатталған (1.2-суретті қараңыз). Егер, осы үлгіде R жүктемесін тұрақты кернеу көзімен ауыстыратын болсақ, онда біз қозғалтқыш үлгісін аламыз.

Дәл айтқанда, осы үлгіде зәкір қызметін атқаратын сымды орамның екі жағынан тұрақты ток өтіп жатқанда, белгілі бағыттың айналмалы кезінің электрмагнитті күштері пайда болады. Орамның әр белсенді жақтарында көздің полярлығын орнатып және ток бағытын көрсете отырып, сол қол ережесін қабылдап әр белсенді жағына әрекет ететін күштің бағытын табамыз. Осы күштер, сағат бағытымен немесе сағат бағытына кері айналатын күштер жұбын жасай отырып, қарама-қарсы бағыттарда жұмыс істейтінін көреміз.

Көзге қосылған 2 щеткалар полярлығы өзгермейді. Зәкір айналған үдерісте 1 жарты сақинаның әрқайсысы байланыстан бір щеткамен шығып, байланысқа екіншісімен келеді, орамның әр белсенді жағындағы токтың бағыты қарама-қарсыға ауысады. Әрбір белсенді жағы магниттің бір полюсінің аймағынан шығады және басқасының аймағына енеді. Нәтижесінде, айналмалы кезеңінің әрбір жартысы арқылы орамның әр белсенді жағы, коммутациядан бұрын басқа белсенді жағы сияқты бірдей жағдайларда пайда болады (щеткалардың бір жарты сақинасынан екіншісіне ауысқанға дейін). Нәтижесінде айналмалы кезінің бағыты өзгеріссіз қалады.

Осылайша, егер генератордың үлгісінде жарты сақиналар бірдей бағыттағы токты алу үшін пайдаланылса (токты түзету үшін), онда қозғалтқыштың үлгісінде жарты сақиналар тұрақты айналу бағытын қамтамасыз етеді.

Баяндалған ақпарат, бұрын аталған электр машиналарының қайтымдылық қасиетін суреттейді.

Тұрақты ток қозғалтқышының конструкциясы. Генераторлар мен қозғалтқыштарға жалпы болатын тұрақты ток машиналарының құрылымы 1.2-бөлімде сипатталған. Қозғалтқыш зәкірінің орамасына тұрақты кернеу көзінен (желіден) қуат беріледі. Зәкір орамасы, бұрын қарастырылған үлгіге қарағанда, 1.4 және 1.5 - бөлімдерде қарастырылған сұлбалар бойынша, бір-бірімен байланысатын бөліктердің айтарлықтай санын қамтиды. Щеткалар мен коллектор тілімшелері арасында сырғымалы түйіспе арқылы, зәкір орамасымен көздің электрлік байланысы, үлгідегі жарты сақиналар сияқты, нақты қозғалтқыштағы қызметті атқарады – олар айналмалы кезеңнің бағыт тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Статорда генератордағы сияқты магнитті ағынды қалыптастыратын қоздыру орамасы бар. Бұдан кейін қозғалтқыштың қоздыру орамасын қосудың әр түрлі сұлбалары қарастырылады.

Генератор режимінде де, қозғалтқыш режимінде де тұрақты ток

машинасы жұмыс істеп тұрған кезде, машинаның нәтижелі өрісіне әсер ететін, өзіндік магнит өрісін жасайтын зәкірдің орамасынан ток ағады.

Қозғалтқыштағы зәкір реакциясының ерекшеліктері 1.6-бөлімде белгіленген. Атап айтқанда, зәкір реакциясы қозғалтқыштың физикалық бейтараптамасының генератордағыдай айналу бағытымен емес, айналу бағытына қарсы жылжуына әкеледі деген қорытындыға келдік.

Ток өзгергенде коммутацияланған бөлімде пайда болатын, өзін-өзі индукциялайтын құбылысымен байланысты машинадағы тұрақты ток коммутациясы 1.7 – бөлімде қарастырылған.

Коммутация жағдайын жақсарту жөніндегі шараларының бірі ретінде, қосымша полюстерді пайдалану туралы 1.8-бөлімде айтылған және негізгі полюстен кейінгі қозғалтқышта (генераторға қарсы полярлықта) бірдей полюстің қосымша полюсі (айналу бағыты бойынша) ілесу керек деген қорытынды жасалды.

Тұрақты ток қозғалтқыштары, ауқымды кеңістікте айналу жиілігін бірсарынды реттеу қажет болған жағдайда пайдалынады, мысалы, электрлік көлік құралдарында, крандарда және әртүрлі өнеркәсіптік қондырғыларда қолданылады.

3.2. ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШЫНЫҢ ПӘК ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ДИАГРАММАСЫ.

Тұрақты ток қозғалтқышының ПӘК. Электр қозғалтқыш электр энергиясын механикалық түрге айналдырады. Осы түрлендіру үдерісінде қозғалтқыш білігіндегі P_2 пайдалы механикалық қуаты P_1 желісінен тұтынылатын қуатынан әрдайым аз болатындықтан, энергия шығыны пайда болады. Барлық қуат шығындарының сомасын $\sum P$ деп белгілейміз. Сонда біз келесі теңдеуді жаза аламыз:

$$P_1 = P_2 + \sum P \quad (3.4)$$

Бұл теңдеудің генератор үшін жазылған теңдеуі (2.1) сияқты нысаны бар, бірақ генератордың жағдайында P_1 және P_2 шамаларының мағынасы әртүрлі (іс жүзінде кері, 2.1 - бөлімін қараңыз).

Қозғалтқыштың желісінен тұтынылатын P_1 қуаты, тұтынылатын токқа желінің кернеуін шығарумен анықталады: $P_1 = UI$ (генератордың жағдайында пайдалы электр қуаты ұқсас формуламен көрсетілген, бұл жағдайда U белгісі генератор қысқыштарындағы кернеуді

білдіреді).

Қозғалтқыштың P_2 теңдеуінен (3.4) пайдалы қуатын білдірейік:
 $P_2 = P_1 - \sum P$. Қозғалтқыштың ПӘК үшін өрнек жазамыз:

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (3.5)$$

Осылайша, генератор сияқты қозғалтқыштың ПӘК тұтынылатын қуаттан қанша қуат жұмсалатындығын көрсететін бірліктен аз ((2.2) және (2.3) өрнегімен салыстыру).

Тұрақты ток қозғалтқышының энергетикалық диаграммасы. Қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы 3.2 - суретте көрсетілген, ол тұтынылатын электр қуатын пайдалы механикалық түрге айналдыру үдерісін бейнелейді (генератордың энергетикалық диаграммасымен салыстырыңыз, 2.1-сурет).

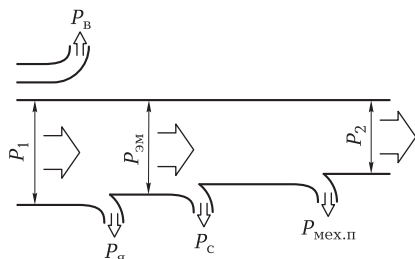
P_1 және P_2 деп белгіленген шамалардың мағынасы жоғарыда түсіндірілген. Басқа шамалардың мағынасы 2.1-бөлімде түсіндірілген.

Суретте көрсетілгендей 3.2-диаграммасы, қоздыру орамасы қозғалтқыш зәкірі сияқты бір көзден жұмыс істейтінін болжайды. Бұл параллельді, жүйелі немесе аралас қоздыру жағдайларында болады. Дегенмен, қозғалтқышта, генератордағыдай тәуелсіз қоздыруды қолдануға болады.

Диаграммадан P_1 тұтыну қуаты P_B қоздыру орамасының қуатына, сондай-ақ Ря зәкірдің шығындалу қуатына жұмсалатынын көруге болады. Қалған бөлігі $P_{эм}$ *электрмагниттік қуатын* ұсынады:

$$P_1 = P_{эм} + P_{я} + P_{в}, \text{ немесе } P_1 = P_{эм} \nu + P_{я} + P_{в}, \quad (3.6)$$

өйткені жоғарыда айтылғандай (теңдеуге түсініктемені қараңыз (3.3)), электрмагниттік қуат $P_{эм}$ механикалық қуатына тең, бұл жерде $P_{эм}$ - электрмагниттік күш; ν - белсенді өткізгіштердің сызықтық жылдамдығы.



3.2.-сурет. Тұрақты ток қозғалтқышының энергетикалық диаграммасы.

Егер қозғалтқышта тұрақты магниттен қоздыру қолданылса, электромагнитті қуат сондай-ақ EI көбейтіндісімен көрсетіледі (3.1 - бөлімін қараңыз). Сол сияқты, электромагниттік қуат, тәуелсіз көзінен тізбекті қуат беру кезінде, сондай-ақ қоздыру орамаларын зәкірмен жүйелі қосу арқылы (бұл жағдайлар төменде талқыланады) көрсетілген. Дегенмен, параллель қоздыру кезінде, келтірілген сымдардағы I тогы $I_{\text{я}}$ зәкір тогына және $I_{\text{в}}$ қоздыру тогына тармақталады. Бұл жағдайда электромагниттік қуат $EI_{\text{я}}$ ретінде көрсетіледі, өйткені ол зәкірдегі токқа байланысты болады.

$P_{\text{я}}$ және $P_{\text{в}}$ қуаттары негізінен джоуль жылуына келетін шығындарды білдіреді:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}; P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

мұндағы $R_{\text{я}}$ - щеткалардың кедергісімен және өтпелі түйісулердің кедергісімен бірге зәкірдің кедергісі; $R_{\text{в}}$ - қоздыру орамасының кедергісі бар қоздыру тізбегінің жалпы кедергісі және қоздыру тізбегінің реттеуші реостатының кедергісі. Жүйелі қоздыру жағдайында зәкір тогы қоздыру тогына тең.

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, сондай-ақ, қозғалтқыштың тұтынатын P_1 қуаты UI тең болған фактіні ескере отырып, теңдеулерді (3.6) параллельді және жүйелі қоздыру үшін дұрыс болатын түрінде қайтадан жазамыз:

$$UI = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}. \quad (3.7)$$

Белгілі жағдайда I , $I_{\text{я}}$ және $I_{\text{в}}$ токтарының арасындағы байланысты ескеру қажет.

Пайдалы P_2 механикалық күшімен $EI_{\text{я}}$ -ге тең $F_{\text{эм}}$ механикалық қуатын шатастырмау керек; сонғысы $P_{\text{с}}$ болаттағы шығындар қуатына механикалық қуатынан және $P_{\text{мех.п}}$ механикалық шығындар қуатынан диаграммасында көрсетілгендей төмен болады (3.2-суретті қараңыз):

$$P_2 = F_{\text{э}} v - (P_{\text{с}} + P_{\text{мех.п}}) \text{ немесе } P_2 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{с}} + P_{\text{мех.п}}). \quad (3.8)$$

3.3. ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШЫНЫҢ ЭЛЕКТРМАГНИТТІ ИІНКҮШІ

Электромагниттік иінкүшінің теңдеуін шығару. Электромагниттік өріске оның күш сызықтарына орналастырылған, өрнекпен анықталатын ток өткізгішіне электромагниттік күш әсер етеді (1.2). Электр машинасында магнит өрісінің индукциясы статордың айна-

ласында тұрақты емес екені 2.2-бөлімде белгіленген.

Оның полюс ұштығының ортасында ең үлкен мәні бар және машинаның бейтараптамасында нөлге тең болады. Сондықтан теңдеулерді жазу кезінде B_{cp} орташа магниттік индукция тұжырымдамасы қолданылады. Содан кейін, зәкір орамасының жеке белсенді өткізгішіне әрекет ететін орташа күшке біз келесіні жаза аламыз:

$$F_{cp} = B_{cp} I_{np} I, \quad (3.9)$$

Мұндағы I_{np} — өткізгіш бойымен өтетін ток.

Магнит өрісіне сүйене отырып 2.2-бөлімде көрсетілгендей, B_{cp} шамасын бір полюстің Φ ағыны арқылы көрсету мүмкін:

$$B_{cp} = \Phi / (l\tau)$$

мұндағы τ — полюстік бөлу ((1.8) формуланы қараңыз); $l\tau$ — полюстік бөлудің ауданы.

Зәкір тогы арқылы I_{np} тогы

$$I_{np} = I_{\pi} / (2a)$$

сияқты беріледі: мұндағы $2a$ — параллельді зәкір орамасының тармақтар саны.

Орта магниттік индукцияның және өткізгіш тогының өрнегін формулаға (3.9) қояйық:

$$F_{cp} = \frac{\Phi}{l\tau} \frac{I_{\pi}}{2a} I = \frac{\Phi I_{\pi}}{2a\tau}.$$

P_{cp} күшінің әсерінен туындайтын орташа M_{cp} айналмалы кезі осы күштің иініне тең, ал иін зәкір орамасының R айналу радиусына, яғни іс жүзінде зәкір радиусына тең болады:

$$M_{cp} = F_{cp} R = \frac{\Phi I_{\pi} R}{2a\tau}.$$

Дегенмен, айналмалы кезі радиусқа тәуелді емес екенін көрсету қиын емес. Нақты айтқанда, соңғы өрнектің бөлгішінде болған m полюстік бөлу, теңдеуге (1.8) сәйкес зәкір радиусына пропорционалды болады, оны

$$\tau = \frac{2\pi R}{2p} = \frac{\pi R}{p},$$

түрінде қайта жазамыз, мұндағы p — статор полюстерінің жұптар саны.

Енді соңғы теңдікті айналмалы кезінің өрнегіне жазамыз және келесіні аламыз:

$$M_{\text{ср}} = \frac{\Phi I_{\text{я}} R p}{2\pi R} = \frac{\Phi I_{\text{я}} p}{2\pi a}.$$

Машинаның электрмагниттік иінкүші зәкір орамасының әр белсенді өткізгіштеріне әсер ететін иінкүштердің жиынтығына тең. Егер белсенді өткізгіштер саны N , онда қажетті иінкүш

$$M = M_{\text{ср}} N = \frac{\Phi I_{\text{я}} p N}{2\pi a} = \frac{p N}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}},$$

немесе

$$M = c_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}. \quad (3.10)$$

болады.

Мұндағы

$$c_{\text{м}} = \frac{p N}{2\pi a} \quad (3.11)$$

— машина құрылымымен анықталатын тұрақты шама.

Электрмагниттік сәт машинаның механикалық жүктемесін сипаттайды, ал теңдеуден (3.10) *механикалық жүктеменің өсуімен зәкір тогы* (демек, берілген ток) артатыны белгілі. Бұл орындалған жұмыстарды ұлғайту үшін энергия тұтынуын арттыруға қажет.

Электрмагниттік иінкүштің алынған өрнегі, тек қана осы иінкүш пайдалы жұмыстарды орындауға қажетті қозғалтқыш үшін ғана емес, сонымен қатар жетек қозғалтқыштың айналмалы кезеңіне қарсы келетін *генератор үшін* де жарамды екенін ескереміз (салыстырып көріңіз, бұл 2.2-бөлімнің соңғы абзацында келтірілген.).

Қозғалтқыштың иінкүштерін теңдестіру. Қозғалтқыштың білігінде M_2 пайдалы иінкүші формула бойынша (3.10) анықталатын M электрмагниттік иінкүштен аз болады.

Біріншіден, қозғалтқышқа M_0 бос жүріс иінкүшінен өту керек, оның атауы жүктеменің жоқтығымен және механикалық шығындармен, атап айтқанда, щеткалардың коллекторға, мойынтіректерге үйкелістерімен, желдету шығындарымен, сондай-ақ болаттағы шығындармен анықталады. Көрсетілген механикалық шығындар қуаты алдында $P_{\text{мех.п}}$ арқылы, ал болаттағы қуаттың жоғалуы - P_c деп белгіленеді (3.2-суретті қараңыз).

Екіншіден, егер ротордың айналу жылдамдығы өзгерсе, онда қозғалтқышқа айналмалы зәкірдің *J инерция иінкүшіне* және Ω айналудың бұрыштық жылдамдығының қарқындығына тәуелді M_j *динамикалық иінкүшінен* өту керек:

$$M_J = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.12)$$

ал бұрыштық жылдамдықтың $d\Omega$ өзгерісі оң (бұрыштық жылдамдықтың өсуі) немесе теріс (төмендеу) болуы мүмкін.

Ескерту.

1. J инерция иіңкүші айналмалы дененің инертті қасиеттерін сипаттайды. Атап айтқанда, R қашықтықта айналу осінен орналасқан массалық m нүктесіндегі материал нүктесінің инерция иіңкүші mR^2 -ге тең; m массамен және R радиусымен цилиндрдің осіне қатысты инерция иіңкүші $\frac{1}{2} mR^2$ -ге тең.

2. Ω айналмалы бұрыштық жылдамдығы секундына радиандармен СИ бірліктер жүйесінде көрсетіледі. Ротордың бір айналымына 2π радианның айналымына сәйкес болғандықтан, 1 айн/мин айналым жылдамдығына $2\pi/60 = \pi/30$ рад/с бұрыштық жылдамдығы сәйкес келеді. Осыдан, техникада минутына орамдар мен бұрыштық жылдамдықпен өлшенетін n айналу жиілігі арасында байланысты есептеу қиынға соқпайды:

$$n \text{ [айн/мин]} = 9,55\Omega \text{ [рад/с]}. \quad (3.13)$$

3. Ілгерімелі қозғалыс үшін теңдеудің ұқсастығы (3.12), әсер ететін F материалды нүктесіне берілген a үдеуін есептейтін инерциалды жүйесінде осы күшке пропорционалды болады деп бекітілген Ньютонның екінші заңы болып табылады; пропорционалдық коэффициенті ретінде оның инерция өлшемі болып табылатын материалдық нүктенің m массасы болады:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt},$$

мұндағы c — материалдық нүктенің шапшаң жылдамдығы; a — үдеткіш шапшаң жылдамдықты өзгерту қарқының ұсынады. Егер күш (күштердің нәтижесі) нөлге тең болса, онда үдеткіш нөлге тең (жылдамдық тұрақты) болады.

Тиісті шамаларға айналмалы қозғалысты сипаттайтын, соңғысында шама өрнегін ауыстыру арқылы дененің ілгерімелі қозғалысын көрсететін (M күшінде F күшін, J инерция кезінде m масса, Q жылдамдыққа v бұрыштық сызықты жылдамдығына), теңдеуді аламыз (3.12).

Жоғарыда айтылғандардан қозғалтқыш сәттерінің теңдеуі керек:

$$M = M_2 + M_0 + M_J, \quad (3.14)$$

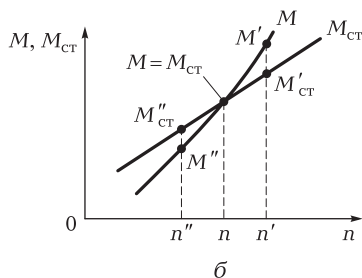
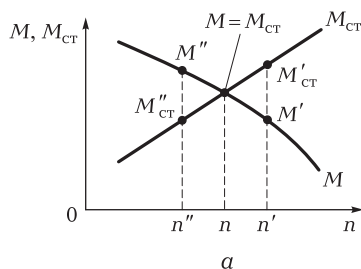
Сонымен бірге ротордың айналу жылдамдығы жоғарылаған кезде M_J динамикалық иінкүш оң болады және оны электрмагниттік иінкүшпен еңсеру керек. Айналу жылдамдығы төмендеген кезде динамикалық иінкүш төмендейді, қажетті электрмагниттік иінкүш те төмендейді.

Қозғалтқыш тұрақты жылдамдықпен жұмыс істегенде, M_J динамикалық иінкүш нөлге тең болады, бұл жағдайда электрмагниттік иінкүш тек пайдалы иінкүш пен бос жүрістегі иінкүштен тұратын қозғалтқыштың M_{ct} білігіне арналған статикалық иінкүшті ғана өтеді:

$$M = M_{ct} = M_2 + M_0. \quad (3.15)$$

Қозғалтқыштың жұмыс тұрақтылығы. Электрмагниттік M иінкүшінен n айналу жылдамдығына тәуелділігінің сипаты бойынша анықталады (мұндай тәуелділік қозғалтқыштың *механикалық сипаттамасы* деп аталады).

Айналдыру жылдамдығы ұлғайған сайын, электрмагниттік иінкүш ұлғаю мүмкін (3.3, *a*-сурет) және азаю мүмкін (3-сурет). Тежегіш M_{ct} статикалық иінкүшінің кестесі де 3.3-суретте көрсетілген, ол жылдамдықтың өсуімен артады. Жиілікке тежегіш статикалық иінкүшінің тәуелділігі, электр қозғалтқышы қарастырылған механизмнің ерекшеліктерімен анықталады. Атап айтқанда, M_{ct} шамасы жиілік өзгерген кезде өзгермеу мүмкін. Мысалы, ауыр көтеретін крандарда, металл кесетін білдектердің ілгерілету механизмдерінде



3.3.-сурет. Тұрақты ток қозғалтқыштарының механикалық сипаттамалары: *a* — қозғалтқыш тұрақты жұмыс істейді; *б* — тұрақты жұмысы мүмкін емес болады.

болады.

M және $M_{\text{ст}}$ қисықтарының қиылысу нүктесі осы иіңкүштердің теңдігіне сәйкес болады, демек зәкірдің айналу жиілігінің тұрақтылығына сәйкес келеді.

Мысалы, қозғалтқыш 3.3 *a*-суретте ұсынылған механикалық сипаттамаға ие болсын және n тұрақты жиілікте айналатын болсын. Егер, қандай да бір себептермен айналу жиілігі аздап өссе және n' сияқты бірдей болса, онда сұлбада көрініп тұрғандай, $M_{\text{ст}}$ *тежегіш иіңкүші* электромагниттік иіңкүштен асып түседі.

Осылайша айналу жиілігі, иіңкүштердің теңдігі орындалатын n мәніне дейін азаяды. Айналдыру жиілігінің n' мәніне дейін кездейсоқ төмендеген кезде, M *электромагниттік иіңкүші* $M_{\text{ст}}$ *тежегіш иіңкүшінен үлкен болады*. Зәкір қайтадан L жиілігіне қарай қарқындайды. Осылайша айналу жылдамдығының кез келген өзгерісінде қозғалтқыш айналу және тежегіш иіңкүштер жағдайына оралады. Физикада осындай жағдайды тұрақты теңдік жағдайы деп атайды.

Енді, 3.3, *б* – суретте көрсетілген қозғалтқыш механикалық сипаттамаға ие болған жағдайды және тұрақты n жиілікпен айналатынын қарастырайық. Егер айналу жиілігі кішкене өссе және n' -ге тең болса, онда M электромагниттік иіңкүш $M_{\text{ст}}$ тежегіш иіңкүшінен үлкен болады, бұл айналу жиілігін одан әрі ұлғайтуға әкеледі.

Қозғалтқыштың айналу жылдамдығының ерекше ұлғаюымен сипатталатын қозғалтқыштың «тозуы» орын алады, ол машинаның бұзылуына әкелу мүмкін. Егер, айналу жиілігі төмендеп және n -ге тең болса, онда $M_{\text{ст}}$ тежегіш иіңкүші M электромагниттік иіңкүшінен көбірек болады, жиілік одан әрі төмендейді, нәтижесінде қозғалтқыш тоқтайды.

Осылайша, 3.3, *б* - суретте көрсетілген механикалық сипаттамалар қозғалтқыштың толықтай тұрақсыз жұмысына сәйкес келеді.

Болашақта қозғалтқыштардың магниттік ағындарды қоздырудың басқа әдісімен сипаттамалары қарастырылатын болады және әрбір сипаттаманың түрі неге тәуелді болатындығын анықтайтын болады.

3.4. ПАРАЛЛЕЛЬ ҚОЗЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШЫ

Параллель қоздыру қозғалтқышының сұлбасы. Тұрақты ток генераторлары генераторлар сияқты қоздыру орамаларын қосу әдісімен жіктеледі: тәуелсіз, параллель, жүйелі, аралас қоздыру қозғал-

тқыштары. Магнит ағынын қоздыруға шығындалатын қуат қозғалтқыштың номиналды қуатының 1...5% құрайды.

Стандартты әріп белгілері пайдаланылған параллель қоздыру қозғалтқышының сұлбасы 3.4, a - суретте келтірілген: M - қозғалтқыш; LM - қозғалтқышты қоздыру орамасы. Бұл сұлбаны параллель қоздыру генераторының сұлбасымен салыстыру дұрыс (2.6-суретті қараңыз). Зәкірдің $I_{\text{я}}$ тогына және $I_{\text{в}}$ қоздыру тогына тармақталатын қозғалтқыштың қуат көзі берілген өткізгіштерде I тогын тудырады:

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}, \quad (3.16)$$

ал генераторда, зәкірдің тогы жүктеме тогына және қоздыру тогына тармақталады ((2.10) теңдеуді қараңыз).

Теңдеуді (3.16) ескере отырып, тұтынылатын қуатты электрмагниттік қуатқа айналдыруды көрсететін теңдеуді қайта жазайық (3.7):

$$U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}; \quad UI_{\text{я}} + UI_{\text{в}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{я}},$$

мұндағы $R_{\text{в}}$ қоздыру сұлбасының кедергісі қоздыру орамасының кедергісін және $R_{\text{рег}}$ реттеуші реостаттың кедергісін қамтиды. Іске қосу жүзеге асырылды және іске қосу реостаты шығарылды деп болжанады (төменде қараңыз).

U кернеу қозғалтқыш зәкіріне, сондай-ақ зәкірге параллельді қосылған қоздыру тізбегіне қосылған. Ом заңы бойынша $U = I_{\text{в}} R_{\text{в}}$ болады, сондықтан $UI_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$ болады. Сонымен, алдын көрсетілген теңдеуді келесіге айналдырамыз

$$UI_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

яғни

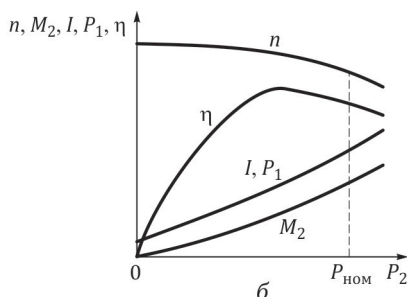
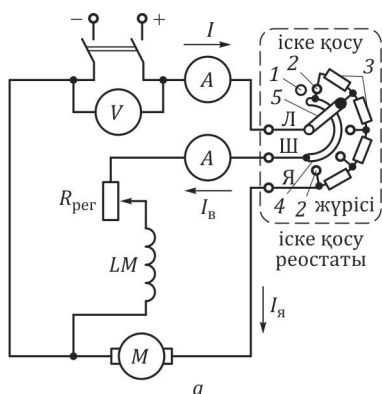
$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (3.17)$$

Осылайша, параллель қоздыру қозғалтқышы үшін теңдеуге ұқсас (3.2) теңдік алынды. $UI_{\text{я}}$ көбейтіндісі қозғалтқыштың тұтынатын барлық қуатын емес, тек қана үлкен болсада оның жартысын ұсына-тының ескеру керек. Теңдеуден (3.17) бірден параллельді қоздыру жағдайы үшін дұрыс теңдікті аламыз

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (3.18)$$

(Тұрақты магниттен қоздыру жағдайы үшін жазылған (3.18) теңдеуді (3.1) теңдеумен салыстырыңыз. Параллельді қоздыру кезінде қоздыру тогы зәкірдің номиналды тогымен салыстырғанда кіші болады, сондықтан $I_{\text{в}}$ берілген сымдарындағы мәнінен $I_{\text{я}}$ мәні аз ерекшелетінің айта кету керек).

Генератор сұлбасынан параллель қоздыру қозғалтқыш сұлбасының айырмашылығы, сонымен бірге 3.4, a – суретінің оң жағында көрсетілген, іске қосу реостатында болады. Іске қосу рео-



3.4.-сурет. Параллельді қоздыру қозғалтқышы:

a — іске қосу реостатының сұлбасы: 1 — бос түйісу; 2 — жұмыс істейтін түйісу; 3 — іске қосу реостатының бөлімдері; 4 — түйісу доғасы; 5 — сырғымалы түйіспе; b — жұмыс сипаттамалары

статы іске қосу тоқты азайтуға арналған. Қозғалтқышты іске қосу туралы мәселесін жете қарастырайық.

Қозғалтқышты іске қосу. Қозғалтқыштың тендеуінен (3.18) зәкір тоғын көрсетеміз (3.18).

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}. \quad (3.19)$$

Формулаға (2.7) сәйкес E қарсы ЭҚК зәкірдің айналу жиілігіне және Φ машинаның негізгі магнитті ағынына тікелей пропорционалды болып келеді. Іске қосу кезінде, айналу жиілігі n нөлге тең болған кезде, E қарсы ЭҚК де нөлге тең болады. Содан кейін, бастапқы уақыт кезіндегі зәкір тоғының өрнегі келесідей болады

$$I_{я.пуск} = \frac{U}{R_{я}}. \quad (3.20)$$

$R_{я}$ зәкірінің кедергісі - кіші шама болып табылады және тікелей іске қосу кезінде (зәкір орамасы тұрақты кернеу желісіне тікелей қосылған жағдайда) зәкір тоғы қозғалтқыш қуатына байланысты номиналды токтан 10–20 есе және одан да көп асатын мәнге жетуі мүмкін.

Қозғалтқышты іске қосу кезінде шамадан тыс іске қосу тоғының пайда болуын болдырмауға тырысады. Қозғалтқышты іске қосудың келесі әдістері қолданылады:

- тікелей іске қосу ($R_{я}$ мәні біркелкі үлкен, қуаты бірнеше жүз ватқа дейінгі қозғалтқыштар үшін);

- зәкір тізбегіне дәйекті қосылатын іске қосу реостаттың көмегімен іске қосылады;
- төмен кернеу кезінде іске қосу.

Іске қосу реостаты бірнеше бөлімнен тұрады (3.4, *a* - суретті қараңыз). Сырғымалы түйісу 5 іске қосылудан бұрын 1 бос түйісуде болады.

Қозғалтқышты іске қосу үшін сырғымалы түйісуді бірінші жұмыс істейтін түйісуге 2 («іске қосу» жағдайына) ауыстырады, содан кейін барлық іске қосу бөліктерінің $R_{п.р}$ кедергілері зәкір тізбегіне қосылады.

Бұл жағдайда зәкір тогы келесі мәнін қабылдайды

$$I'_{я.пуск} = \frac{U}{R_{я} + R_{п.р}}. \quad (3.21)$$

$R_{п.р}$ мәнін, $I_{я.пуск}$ іске қосу тогы $I_{я.ном}$ зәкірдің номиналды тогынан 1,5 — 2,5 есе үлкен болатындай таңдайды (іске қосу тогы туралы айтқанда, көбінесе зәкір тогын емес, берілген сымдардағы ток туралы айтады. 3.4, *a* - суретте көрсетілген сұлбада дәл теріс ток өлшенеді). Егер іске қосу ток тым төмен болса, онда іске қосудың айналдыру кезі де төмен болады, сонда қозғалтқыштың білігіне айтарлықтай жүктеме кезінде қозғалтқышты іске қосу мүмкіндігі болмауы мүмкін.

Қозғалтқыш жылдамдаған сайын қарсы ЭҚК күшейеді, демек, зәкір тогы азаяды. Іске қосу реостаттың кедергісін кезеңмен төмендетеді, оның сырғымалы түйісуін кейінгі жұмыс істейтін түйіспеге ауыстырады. Әрбір ауыстыру кезінде, зәкір тогы $I'_{я.пуск}$ бастапқы шамасына ұлғаяды, содан кейін айналу жиілігі мен қарсы ЭҚК күшейген сайын қайтадан азаяды. Жылдамдықтың соңында сырғымалы түйісу соңғы жұмыс істейтін бастапқы реостатқа сәйкес келетін, соңғы жұмыс істейтін түйіспеге («іске қосу» жағдайында) орналастырады. Іске қосу реостат қозғалтқышты іске қосу кезінде қысқа мерзімді жұмысқа арналған және тоқты реттеуге арналмаған, сондықтан қозғалтқыштың жұмысы кезінде сырғымалы түйісу «іске қосу» күйінде қалуы керек.

Барлық іске қосу әрекетінде және одан кейін қозғалтқыштың жұмыс кезінде де, қозғалтқышты қоздыру тізбегі үнемі қуат көзінің толық кернеуінде болу қажет. Осы шартты орындау үшін, сырғымалы түйісуімен тұрақты электр байланысы бар 4 түйіспе доғасы қамтамасыз етілген. Сонымен қатар, қоздыру тізбегінің реттеу реостатын іске қосу кезінде уақытша шығарады. Бұл қозғалтқыш білігіне ең үлкен іске қосуын қамтамасыз етеді, себебі қоздыру тогы мен магнит ағы-

ны осы жағдайда максималды болады. Параллель қоздыру қозғалтқыштарымен қолданылатын іске қосу реостатының үш қысқышы бар: Л («сызық») қысқышы сырғымалы түйіспені қуат көзімен қосады; Қысқыш Ш («шунттау орамасы») түйіспе доғаны қоздыру тізбегімен қосады; Қысқыш Я («зәкір») іске қосу реостаттың қозғалтқыштың зәкірімен соңғы жұмыс түйіспені байланыстырады.

Іске қосу үдерісін автоматтандыру үшін, түйістіргіштер пайдаланылады, олардың түйістіргіштері іске қосу бөліктерімен параллель қосылған. Қозғалтқыш жылдамдаған сайын, түйістіргіштер біртіндеп бөліктерді шунттап тұйықтайды.

Қозғалтқыштың іске қосу сипаттамалары іске қосу тогының номиналды тұтынатын $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ тогына қатынасымен, іске қосу айналымалы кезінің қатынасымен $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ номиналды кезіне іске қосу уақытымен, сондай-ақ біртіндеп іске қосу-қатынасына байланысты анықталады.

Параллельді қоздыру қозғалтқышының іске қосуы төмен кернеу кезінде, әртүрлі көздерден қозғалтқышты және қоздыру орамасын қуат бергенде, яғни тәуелсіз қоздыру жағдайында іске асырылады.

Қозғалтқыштың жұмыс сипаттамасы. Жүктеме тәуелділігін білдіреді (яғни, білікте P_2 пайдалы қуаты) түрлі мөлшерде: p зәкірдің айналу жиілігі; M айналдыру (электромагнитті) кезі; M_2 біліктегі тиімді кезі; берілген өткізгіштердегі I тогы; P_1 тұтынатын қуаты; η пайдалы әрекеттің коэффициенті. Сипаттамалар U қуат көзі кернеуінің тұрақты мәндерінде тәжірибелік жолмен алынады. Параллель қоздыру қозғалтқышының жұмыс сипаттамалары (M қисықтан басқа) 3.4, б – суретте көрсетілген.

Осы тәуелділіктердің ерекшеліктерін қарастырайық.

Айналу жиілігінің n параллель қоздыру қозғалтқышының P_2 пайдалы қуатына тәуелділігі қатаң болады. Бұл айналу жиілігі жүктеме ұлғайған сайын болмашы өзгеретінін білдіреді. Айналу жиілігі қандай факторларға қатысты екенін анықтау үшін, қарсы ЭҚК (2.7) өрнегін қозғалтқыш теңдеуіне (3.18) ауыстырып қоямыз:

$$U = c_e \Phi n + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

Айналу жиілігін, жазылған өрнектен білеміз

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi}. \quad (3.22)$$

Пайдалы қуат ұлғайған сайын зәкір тогы күшейеді, сондықтан зәкір кедергісінде $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ зәкір кернеуінің төмендеуі артады және тең-

деудегі бөлшек алымы (3.22) азаяды. Бұл жағдайда n айналу жиілігі төмендеу керек. Дегенмен, зәкір тогының ұлғаюы зәкір реакциясының магнитсіздендіру әсерін арттырады, соның нәтижесінде қозғалтқыштың Φ магнитті ағыны төмендейді.

Соңғы фактор оның ұлғаюына қарай айналу жиілігіне әсер етеді, өйткені Φ мәні n өрнегінің бөлгішінде болады.

Осы екі фактордың бірлескен әсерінің нәтижесінде жүктеме артқан сайын айналу жиілігі азаяды немесе артады. Жиіліктің артуы бірнеше киловатт немесе одан артық қуаты бар параллельді қозғалтқыштарда пайда болады, өйткені зәкір реакциясы төмен қуатты машиналарға қарағанда айтарлықтай көрінеді.

Айналу жиілігінің қозғалтқыш білігіне пайдалы қуатқа тәуелділігі арта түскен жағдайда, қозғалтқыштың жұмысы тұрақсыз екенін көрсетуге болады. (3.3-бөлімде тұрақтылық мәселесі механикалық сипаттамаларды талдау негізінде талқыланды.) Жұмыстың тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін, тұрақтандырғыш орамасы қозғалтқыштың негізгі тіректеріне орналастырылады, оның магниттік ағыны параллельді қоздыру орамасына сәйкес, бағытталатындай етіп, зәкір орамасымен жүйелі түрде қосады. Тұрақтандырғыш ораманың магниттік ағыны зәкір реакциясының магнитсіздендіру әсерінің орнын толтырады. Нәтижесінде, айналу жиілігінің пайдалы қуатынан абсцисс осіне сәл қисайған пайдалы қуатынан тік сызықты тәуелділігі пайда болады, сондықтан, нөлден номиналды мәнге дейін өзгеріп отырғанда, жиілік 2 ... 8% ғана төмендейді.

Кгс-м кезінде өлшенген қозғалтқыштың M_2 пайдалы иінкүші, P_2 Вт білігіне пайдалы қуатпен келесі қатынаспен байланысты болады: $P_2 = M_2 \Omega$, мұндағы Ω — айналудың бұрыштық жылдамдығы, рад/с. (Жазылған қатынас v жылдамдығымен дене қозғалысының ілгерімелі қозғалысында F күшін дамытатын, P қуаты арасындағы белгілі байланысқа ұқсас болады: $P = Fv$; айналу қозғалысы үшін қуат өрнегіне формальды көшу үшін, мәндер тиісті мәндермен ауыстырылады: күш, күштің иінкүшіне немесе жұп күшінің иінкүшіне, жылдамдық - бұрыш жылдамдығына ауыстырылады).

Сонымен, келесіні аламыз

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{9,55 P_2}{n}, \quad (3.23)$$

мұнда айналдыру жиілігі n , айн/мин және Ω бұрыштық жылдамдық арасындағы байланыс пайдаланылады (3.13).

Сонымен, пайдалы иінкүш пайдалы қуатқа пропорционалды және айналу жиілігіне кері пропорционалды болады. Жоғарыда

айтылғанға сәйкес, айналымның жылдамдығы пайдалы қуаттың жоғарылауымен біршама азаяды, пайдалы иінкүш пайдалы қуатқа қарағанда жылдамырақ ұлғаяды. Сондықтан, пайдалы иінкүштің пайдалы қуатына тәуелділік кестесі пропорционалды тәуелділіктің тікелей сызығынан аздап ауытқиды.

Тұрақты айналу жиіліктегі қозғалтқыштың *М айналдыру иінкүші (электр магниттік)* өрнекке (3.15) сәйкес, M_0 бос жүріс иінкүшіне M_2 шамасына қарағанда M_2 пайдалы иінкүштен үлкен болады.

Жүктеме болмаған кезде (бос жүріс кезінде) айналмалы кезі бос жүріс иінкүшіне тең болады. Содан кейін, формула бойынша (3.10), $M=M_0 = c I_{я0} F$ бос жүріс кезінде, мұндағы $I_{я0}$ – бос жүріс кездегі зәкір тогы.

Пайдалы қуатынан айналмалы кезінің тәуелділік кестесі пайдалы иінкүштің кестесін нысан бойынша қайталайды, бірақ $c I_{я0} \Phi$ шамасынан жоғары өтеді.

Зәкір тогын $I_{я}$ формуласымен өрнектейміз (3.10):

$$I_{я} = \frac{M}{c_m \Phi}.$$

Пайдалы қуат ұлғайған сайын, айналмалы кезі мен зәкір тогы күшейеді. Зәкір тогы ұлғайған сайын магнитсіздендіру әрекеті күшейеді, Φ магнит ағыны едәуір азаяды. Нәтижесінде, зәкір тогы айналмалы кезінен әлдеқайда жылдамырақ өседі.

Параллель қоздыру қозғалтқышында *I тұтынатын ток* зәкір тогынан сәл ғана ерекшеленеді, ал оған тәуелсіз және жүйелі қоздыру қозғалтқышында тең болады.

P_1 тұтыну қуаты UI тұындысына тең болады, тұтынылатын ток сияқты өзгереді, өйткені сипаттамаларды алу барысында U көзінің кернеуі өзгермейді.

P_2 тиімді қуатының P_1 тұтынатын қуатына қатынасы бойынша анықталған *пайдалы әрекет η коэффициенті* жүктеме болмаған кезде, яғни нөлдік пайдалы қуатында нөлге тең болады. Жүктеме жоғарылаған сәтте, ПӘК өте жылдам өседі және жүктеме кезінде номиналды жүктемеде шамамен жартысына тең максималды мәнге жетеді, содан кейін ол сәл азаяды. Қозғалтқыштың ПӘК ең жоғарғы мәні - 75 ... 95% құрайды; қозғалтқыштың қуаты неғұрлым көп болса, соғұрлым оның ПӘК ең жоғары болады.

Параллельді қоздыру қозғалтқыштары жүктемені өзгерткенде тұрақты айналу жиілігін, сондай-ақ айналу жиілігін реттеу мүмкіндігін басқаруды талап ететін білдектер мен машиналар үшін қолданылады. Реттеу әдістері 3.5-бөлімдерде талқыланады.

Қозғалтқышты кері бұру. Қозғалтқышты кері бұру үшін, яғни оның зәкір айналу бағытын өзгерту үшін, M айналмалы кезінің бағытын өзгерту қажет. Формулаға (3.10) сәйкес, айналмалы кезі магнитті ағынға және зәкір тогына пропорционалды болады. Магнит ағынның бағыты қоздыру тогының бағытымен анықталады. Осылайша, айналдыру бағытын өзгерту үшін, зәкірдің немесе қоздыру тогының бағытын өзгерту керек, яғни зәкір қысқыштарына қосылған сымдардың ұштарын немесе қоздыру орамасының қысқыштарына қосылған сымдардың ұштарын ауыстыру қажет). Қуат көзінің полюстерін өзгерту қалпына келтіру кері бұруға әкелмейді, өйткені зәкір тогы мен қоздыру тогының бағыттары бір уақытта өзгереді.

Айналу жиілігін реттеу. Кең ауқымды айналу жиілігін бірсарынды реттеу мүмкіндігі, тұрақты ток қозғалтқыштарының негізгі артықшылығының бірі болады. Реттеу әдістерін, теңдеуді талдай отырып анықтауға болады (3.22).

1. Зәкір тізбегінде реттеу реостаты арқылы айналу жиілігін реттеу.

Егер, реттеу реостатын зәкірмен дәйекті қоссақ, айналу жиілігі

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{рег.я}})}{c_e \Phi}, \quad (3.24)$$

(3.24) теңдеу негізінде жазылған теңдеумен анықталатын болады. Зәкір тізбегіндегі реттеуші реостат, іске қосу реостатынан гөрі ұзақ жұмысқа есептеліну қажет (3.4, a -суретінде бұл реостат көрсетілмеген).

$R_{\text{рег.я}}$ кернеуі енгізілген кездегі үдерістерді талдағанда, қуат беру кернеуі тұрақты болып қалатындығын ескере отырып, қозғалыс тогы өзгеріссіз қалады, өйткені қуат беру кернеуі зәкір тізбегіндегі реттеуші реостаттың шамасына қарамастан қоздыру сұлбасына толығымен беріледі. Осы жиілікті реттеу әдісін қарастырған кезде қоздыру тізбегінде реттеуші реостат жоқ деп есептейміз.

Мысалы, қозғалтқыштың зәкірі n тұрақты жиілікте айнала берсін. $R_{\text{рег.я}}$ реттеуші реостаттың кедергісін арттырамыз. Теңдеуге (3.24) сәйкес, бұл жағдайда айналу жылдамдығы төмендеуі керек.

Дегенмен, зәкір J инерция иінкүшімен сипатталатын айтарлықтай инерцияға ие (3.3 - бөлімін қараңыз), сондықтан айналу жиілігі бірден өзгермейді. Сондай-ақ, формула бойынша (2.7) айналу жиілігіне байланысты E қарсыЭҚК бастапқыда бірдей болады. Зәкір тоқтарына келетін болсақ, зәкір тізбегіндегі кедергі ұлғайған кезде, ол іс жүзінде бірден азаяды, сонымен қатар формулаға (3.10) сәйкес зәкір тогына пропорционалды келетін M айналмалы кезі төмендейді. Айналмалы кезі қозғалтқыштың айналуына келтірілетін механизмнің қасиеттері бойынша анықталған жүктемеден аз болады және айналу жылдамдығы азаяды. Айналу жиілігі төмендеуінің салдарынан қарсыЭҚК төмендейді және теңдеуге сәйкес (3.19) $I_{\text{я}}$ зәкір тогы ұлғаяды. Сондықтан, бұрын азайтылған айналу кезі арта түседі және нәтижесінде, қозғалтқыштың стационарлы жұмыс режимі қайтадан орнайды, ондағы айналмалы кезі және жүктеме сәті бір-біріне тең болады. Жаңа (қысқартылған) тұрақты айналу жиілігі теңдеумен анықталады (3.24).

Қарастырылған айналу жиілігін реттеу әдісі үнемді емес; бұл қозғалтқыштың ПӘК төмендетеді, себебі, көрсетілгендей зәкір тізбегіндегі кедергіні ұлғайтқан кезде, тұтынылатын қуат пайдалы қуатына қарағанда көп есе ұлғаяды. Бұл әдіс негізінен төмен қуаты бар қозғалтқышпен қолданылады.

2. Қоздыру тізбегіндегі реттеуші реостат көмегімен жылдамдықты реттеу. Бұл әдіске 3.4, a - суретінде көрсетілген сұлба сәйкес келеді. Қоздыру тізбегінің $R_{\text{в}}$ кедергісі $R_{\text{о.в}}$ қоздыру орамасының кедергісі мен $R_{\text{рег}}$ реттеуші кедергісіне тең болады. Мысалы, қозғалтқыш зәкірі p тұрақты жиілігімен айналсын. Реттеуші реостатының $R_{\text{рег}}$ кедергісін жоғарылатыйық. Сонымен, $I_{\text{в}}$ қоздыру тогы төмендейді және Φ магнитті ағын да азаяды. Сонда, (3.22) теңдеуге сәйкес, айналу жиілігі ұлғаюу тиіс. Бірақ, зәкір инерттілігінен бұл бірден пайда болмайды. E қарсы ЭҚК (2.7) теңдеуде көрініп тұрғандай магниттік ағынға пропорционалды түрде бірден өзгереді (азаяды). (Қоздыру ток тұрақты болып және ЭҚК бірден өзгере алмаған жағдайын, зәкір тізбегіндегі кедергінің өзгеруімен салыстырыңыз). Егер, қарсыЭҚК азайса, теңдеуде (3.19) көрсетілгендей $I_{\text{я}}$ зәкір тогы ұлғаяды.

Белгілі болғандай, M айналмалы кезі зәкір тогына және магнит ағынына пропорционалды болады ((3.10) қараңыз теңдеу). Бірақ зәкір тогының ұлғаюуы магнит ағынының азаюынан әлдеқайда үлкен дәрежеде пайда болады, өйткені $R_{\text{я}}$ зәкірдің қарсылығы өте аз. Осы-

лайша, осы құбылыстардың нәтижесінде айналмалы кезі ұлғаяды және жүктеме сәтінен үлкен болады. Айналмалы кезі ұлғайған кезде айналу жиілігі артады. Бірақ, сонымен қатар қарсыЭҚК күшейе түседі, сондықтан зәкір тогы азаяды. Соңғы жағдай, енді ғана ұлғайған айналмалы кезі қайтадан жүктеме иінкүшіне тең болғанша, яғни (3.22) теңдеумен анықталатын жаңа (ұлғайған) тұрақты жиілікпен айналу жағдайы қайтадан қалпына келмегенше, қайта азаюына әкеледі. Зәкір тогының жаңа мәні (3.19) теңдеуге сәйкес, қарсыЭҚК жаңа мәнімен анықталады.

Қарастырылған айналу жиілігін реттеу әдісте тұтынылатын және пайдалы қуаттар шамамен тең дәрежеде өзгереді, сондықтан қозғалтқыштың ПӘК дерлік тұрақты болып қалады. Бұл әдіс үнемді болады және жиі қолданылады.

Білікте жүктеме болмаған кезде, яғни M_2 нөлдік жүктеме сәтінде I_b қоздыру тогынан n айналу жиілігінің тәуелділігін ұсынатын реттемелік сипаттама көмегімен, магнит ағынының ауыстыру арқылы қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеу диапазонын бағалау. Осы жағдайда зәкір тогы өте аз болады және теңдеу (3.22) жеңілдетіледі:

$$n \approx \frac{U}{c_e \Phi}.$$

Егер қозғалтқыштың магниттік тізбегі қанық болмаса, онда магнит ағыны шамамен қоздыру тогына пропорционалды болады, сонда реттемелік сипаттамасы кері пропорционалдық кестесіне, яғни гиперболаға жақын болады; айналу жиілігінің шағын мәндері қоздыру тогының үлкен мәндеріне сәйкес келеді, ал егер қоздыру тогы өте төмен болса, айналдыру жиілігі қозғалтқыштың механикалық бұзылуына әкелуі мүмкін («тозуына»). Осылайша, параллель қоздыру қозғалтқышы үшін, қалдық магнит өрісі машинада болғанда қоздыру тізбегінің үзілуі қауіпті болады.

Іс жүзінде, қоздыру тізбегінің кедергісін өзгерту арқылы жиілікті реттеу n -нің он есе өзгерісін алуға мүмкіндік береді.

Теңдеулерге (3.22) сәйкес, қозғалтқыштың айналу жиілігін қуат көзінің кернеуін өзгерту арқылы реттеуге болады. Бірақ, бұл зәкірмен қоздыру орамасының бөлек қуат берумен, яғни *тәуелсіз қоздыру қозғалтқышында* ғана жасалуы мүмкін.

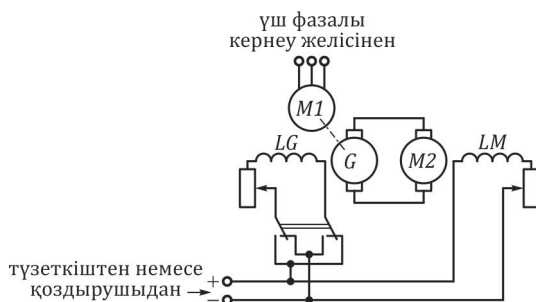
3.6. ТӘУЕЛСІЗ ҚОЗДЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШЫ

Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток қозғалтқышының зәкір орамасы мен қоздыру орамасын тұрақты кернеудің тәуелсіз көздеріне қоздыру орамасының кернеуі өзгермеген жағдайда, нөлдік мәннен бастап зәкір орамасының кернеуін бақылауға болатын мүмкіндігі болу керек (кернеудің қуат көзінен айналу жиілігінің тәуелділігі (3.22) теңдеумен көрсетілген).

Сонымен іске қосу реостатын пайдалану қажеттілігін жояды (іске қосу кернеуді бірте-бірте ұлғайтумен жүзеге асырылады) және айналу жиілігін реттеудің кең диапазонын қамтамасыз етеді. Параллельді және тәуелсіз қоздыру қозғалтқыштарының жұмыс сипаттамалары тұрақты кернеудің қуат көзіне ұқсас болады.

Генератор-қоздырғыш сұлбасы. Тұрақты ток қозғалтқышының айналу жиілігін реттеу үшін кернеуді өзгерту арқылы, атап айтқанда электр машина түрінің түрлендіргіші ретінде генератор-қозғалтқыш сұлбасы (Г-Д сұлбасы) қызмет етеді. Сұлба, 3.5 – суретінде жеңілдетіліп көрсетілген. Тұрақты G ток генераторының зәкірі M_2 тұрақты ток қозғалтқышының зәкірімен тікелей қосады. G генераторы M_1 қандай да бір бастапқы қозғалтқышымен басқарылады, мысалы, үш фазалы асинхронды немесе синхронды қозғалтқышпен (9 және 13-тарауларды қараңыз).

LG генераторының қоздыру орамасы және LM қозғалтқышының қоздыру орамасы, ауыспалы кернеу мен түзеткіш желісі ретінде, қызмет етуі мүмкін бірдей тұрақты кернеу көзінен қуат алады. Сол мақсатта, генераторды айналып өтетін бірдей бастапқы қозғалтқыш M_1



3.5.-сурет. Генератор-қозғалтқыш сұлбасы.

айналу арқылы басқарылатын қосымша тұрақты ток G генераторы қолданылуы мүмкін. Қоздыру ораманы қуат беруға арналған қосымша генератор *қоздырғыш* деп аталады. Қоздырғышты қолданған кезде қоздырғыштың қысқыштарында тұрақты кернеуді сақтау үшін, қоздыру ток реттеуін қамтитын, оның параллельді қоздыру сұлбасын қолданылады.

Реостат арқылы G генераторының LG қоздыру шарғының тізбегіндегі реостат көмегімен токты реттеп, генератордың магнит ағынын, демек оның ЭҚК де өзгертеді ((2.7). теңдеуді қараңыз). ЭҚК өзгерген кезде, M_2 қозғалтқыштың қысқыштарында кернеу болып табылатын генератордың қысқышында кернеу өзгереді. Осылайша, кернеу номиналдыдан төмендеу бағытына дейін өзгеруі мүмкін (номиналдыдан жоғары кернеу қабылданбайды), сонымен жиілік номиналды мәннен төмендеуге дейін өзгереді.

G генераторының қоздыру орамасының тізбегіндегі ток ауыстырғыш қозғалтқышты кері бұруға қызмет етеді.

Жиілікті номиналды мәннен жоғарылатуға қарай реттеу үшін, M_2 қозғалтқышының LM қоздыру шарғының тізбегіндегі токты өзгертеді. Қозғалтқыштың қоздыру тогын азайтқан сайын магнит ағыны азаяды, ал айналу жиілігі артады.

Г—Д сұлбасының ПӘК—70 % артық емес.

Қарастырылған электрмашиналық түрлендіргіш, ең жоғарғы айналу жиілігінің 25-тен асатын ең кіші қатынасты қамтамасыз етеді. Осындай кең ауқымда жиілікті бірсарынды реттеу айнымалы ток қозғалтқыштары үшін қол жетпес болады. Осында қарастырылған тізбекті қолданған кезде, жиіліктердің ең жоғары және ең төменгі қатынасын теориялық түрде алуға болады. Дегенмен, коммутация шарттары бойынша, тым жоғары айналу жылдамдығына жол берілмейді (1.7- бөлімді қараңыз) және қозғалтқыштың зәкірінде кернеу кедергісінің төмендеуімен салыстыруға келетін жылдамдықты тым төмен орнату қуаттың төмен кернеуімен қамтамасыз етіледі. Осындай жағдайларда жүктеменің болмашы өзгерістері айналмалы жылдамдықта айтарлықтай тербелістерге әкеледі. Автоматты кернеуді төмендетудің автоматты өтемін пайдаланған кезде, ең жоғары және ең төмен жиіліктердің қатынасы 10 000-ға дейін ұлғайтылуы мүмкін.

Жартылай өткізгішті түрлендіргіштерді қолдану. Егер кернеудің тиристор түрлендіргішін пайдалансақ Г—Д сұлбасынан бас тартуға болады.

Ескерту. Тиристор - төрт қабатты p - n - p - n -құрылымы

мен үш $p-n$ ауысулары бар жартылай құрылғы. Егер, тиристордың сыртқы электродтарына белгілі қосу кернеуінен аз кернеуді берсек, онда тиристор арқылы ағатын ток аз болады (тиристордың қарсылығы жоғары). *Басқарылатын* деп аталатын ішкі электродына басқаратын кернеуді берсек қосу кернеуін айтарлықтай төмендетуге болады. Осылайша, басқару кернеуі тиристорды *ашады*.

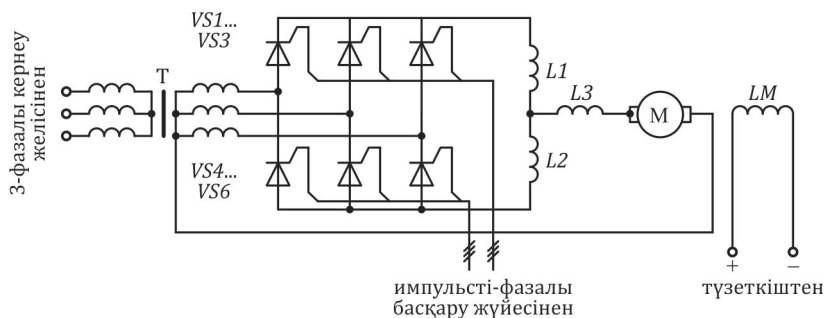
Алты қуатты $VS1...VS6$ (Түзеткіш айнымалы кернеуді бір өтіп тұрған кернеуіне түрлендіреді; «Электрондық техника» курсына түзеткіштің жұмыс қағидасы қарастырылады) тиристорларын қосатын үш фазалы түзеткіш тиристорлы түрлендіргіштің негізгі торабы болады (3.6-сурет). Түзеткіштің кірісіне T трансформатордан үш фазалы кернеу жүйесі келіп түседі. Тиристорлар импульсті фазалық басқарудың автоматтандырылған жүйесімен ашылады, оның көмегімен тиристорлық басқару электродтарына *үшфазалы кернеулер жүйесінің* фазалық ауысуын есепке алатын фазалық ығысуларымен импульстер келіп түседі.

$L1$ және $L2$ дроссельдері тиристорлардың үшбұрыштары арасында ағып жатқан теңдестіру токтарын шектеуге арналған. $L3$ дроссели үшфазалы түзеткіштің шығуында қалыптасқан кернеудің лүпілдеуін тегістеу үшін ұсынылған.

LM қозғалтқышының қоздыру орамасы жеке басқарылмайтын диод түзеткіші арқылы қуат алады.

Тиристорлы түрлендіргіші бар сұлбасы генератор-қоздырушы сұлбасына қарағанда, ықшамырақ болып келеді.

Ол сенімді, оның жоғары ПӘК және жоғары тез әрекеттігі бар



3.6.-сурет. Тиристорлық түрлендіргіш көмегімен қозғалтқышты басқару сұлбасы.

(Г-Д сұлбасының кіші тез әрекеттігі тұрақты ток қозғалтқышын қуат беретін, генератордың қоздыру орамасының айтарлықтай индуктивтілігіне байланысты болады).

Тиристор түрлендіргішінің орнына шағын қуатты тұрақты ток қозғалтқыштарын басқару үшін, *диод түзетуші көпірінен* қозғалтқыш зәкірін қуат беруға болады, ол, өз кезегінде, айнымалы кернеу желісіне қосылған реттелетін автотрансформаторға қосылған (7.1 - бөлімін қараңыз) .

Қозғалтқышты қоздыру сұлбасы генератор-қозғалтқыш сұлбасында көрсетілгендей, реттеуші реостат арқылы тұрақты кернеу көзі арқылы қуат алады. Автоматты трансформатордың қайталама орамасының ЭҚК реттеу арқылы осы ораманың орамдар санын өзгерту арқылы (автотрансформатордың жылжымалы байланысының орнын өзгерту) қозғалтқыштың зәкірінде кернеуді, яғни зәкірдің айналу жиілігін реттейді.

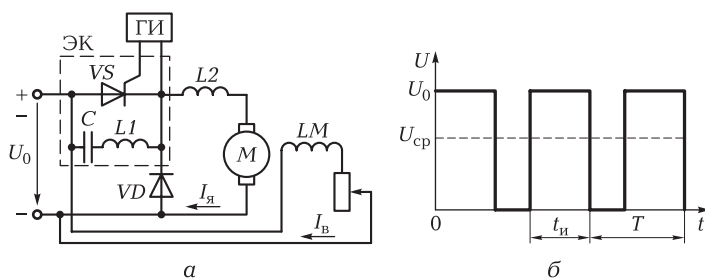
Айналу жиілігінің импульстік реттеуі 3.7, а – суретте көрсетілгендей сұлба бойынша жүзеге асырылады. Осы тізбектің маңызды торабы – бұл тиристор негізінде жүзеге асырылатын электрондық кілт (ЭК). Кілттің функциясы тұрақты U_0 кернеу көзі арқылы қуат алатын, мерзімді тізбекті үзуден тұрады. Импульстер генераторынан (ИГ) қысқа мерзімді басқаратын импульс VS тиристордың басқару электродына беріледі және оны ашады.

Тиристордың ашық жағдайының уақыты тиристорды шунттайтын LC –тізбек параметрлерімен анықталады. Демек, ИГ келетін импульстер жиілігі өзгерген сәтте, ИГ-дан импульстерінен қатынасы T кезеңіне кілттің ашық күйінің t_n ұзақтығы өзгереді. Кілттің кірісінде, ти мерзімінде болатын тұрақты U_0 кернеуі оның шығуында да болады.

Мерзімді тұйықталу және кілттің ашылу нәтижесінде оның шығуындағы кернеу U_0 амплитудасы бар тікбұрышты импульстардың дәйектілігін ұсынады (3.7, б-сурет). Электрондық кілтті шығару кезінде U_{cp} орташа кернеуі көрсетілген уақыт аралықтары бойынша анықталады:

$$U_{cp} = \frac{t_n}{T} U_0,$$

ал, тұрақты ток қозғалтқышының айналу жиілігі оның қысқыштарындағы орташа кернеуге байланысты болады. Осылайша, басқару импульстер жиілігінің өзгеруі қарастырылып отырған сұлбада айналу жиілігінің өзгеруіне әкеледі.



3.7.-сурет. Айналу жиілігінің импульстік реттеуі:

a — сұлба; b — кернеу импульстері

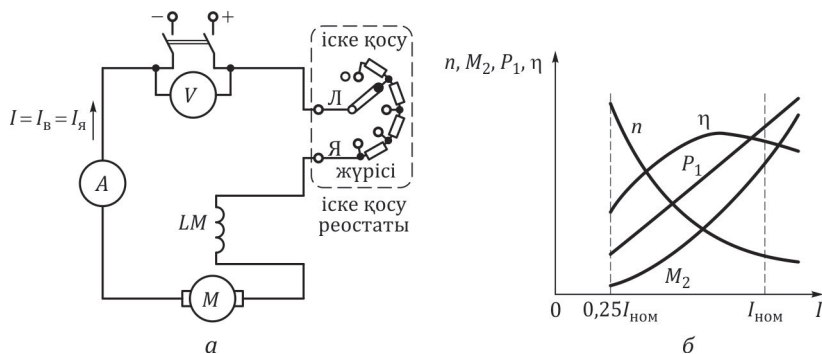
$L2$ дроссели $I_я$ зәкір ток күшінің жүріп тұруын тегістеуге арналған: дроссельдегі электронды кілтті ажыратқанда, токтың шапшан жойылуына жол бермейтін, өзіндік индукцияның ЭҚК пайда болады.

Дегенмен, дроссель $L2$ болған жағдайда VD диоды сұлбада берілмесе, ток бірден тоқтайды. Шынында да, диод болмаған жағдайда электронды кілт ашылған кезде зәкір тогының тізбегі ашық болады. Кілт жабылған кезде, ток U_0 кернеудің көзіне қатысты кері (өткізбейтін) бағытта қосылғандықтан, диод арқылы өтпейді.

Бұл сұлба, мысалы, тиристор түрлендіргіші сияқты, қозғалтқыштың айналу жиілігін кең ауқымда біркелкі басқаруды қамтамасыз етеді. Импульстік бақылау тізбегі, айналмалы кезі өзгерген кезде айналу жиілігінің аз өзгерісін қамтамасыз етеді, яғни оның механикалық сипаттамалары қатаң болады. Токтың импульсті сипаттамасы, импульстік реттеу сұлбасының және тиристорлы түрлендірудің кемшілігі болып табылады, ол коммутация жағдайларын нашарлатады.

3.7. ЖҮЙЕЛІ ЖӘНЕ АРАЛАС ҚОЗДЫРУДЫҢ ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫ

Жүйелі қоздыру қозғалтқышы. Жүйелі қоздыру қозғалтқышының сұлбасы 3.8, a -суретте көрсетілген. Осындай қозғалтқышта жеткізуші сымдарының тогы, арматура тогы және қоздыру тогы бірдей ток болып табылады. Жүйелі қоздыру қозғалтқышының іске қосылуы, сондай-ақ параллель қоздыру қозғалтқышы сияқты іске қосу реостат көмегімен іске асырылу мүмкін. Дегенмен, жүйелі қоздыру қозғалтқышы болған жағдайда, бұл реостаттың үш қысқышы емес



3.8.-сурет. Жүйелі қоздыру қозғалтқышы:

а — іске қосу реостатымен сұлбасы; *б* — жұмыс сипаттамасы

екеуі болады, өйткені оның сұлбасында параллельді тармағы болмайды. Екі қысқышты іске қосу реостатында байланыс доға болмайды (3.4-суретте келтірілген іске қосу реостатпен салыстырыңыз).

Қозғалтқыштың жүйелі қоздыру қозғалтқышының трансформация теңдеуі (3.17) теңдеуге ұқсас жазылу мүмкін:

$$UI = EI + P(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}), \quad (3.25)$$

мұндағы $R_{\text{в}}$ — жүйелі қоздыру орамасының кедергісі.

Теңдеулерді жазғандай (3.17) іске қосу жасалған және бастапқы реостат шығарылған деп есептеледі.

Теңдеу (3.25) жүйелі қоздыру қозғалтқышының теңдеуін көрсетеді:

$$U = E + I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}}). \quad (3.26)$$

Жүйелі қоздыру қоздырғышының жұмыс сипаттамалары. Олар, 3.8, б - суретте көрсетілген. Бұл сипаттамалардың дәлелі ретінде, әдетте пайдалы қуат P_2 емес, тұтынылатын I ток салыстырмалы түрде таңдалады (3.4, б – суретімен салыстырыңыз). Себебі білікте қуат күшейген сайын (бірақ сызықты түрде емес) ток ұлғаяды, P_2 дәлелін I дәлелмен ауыстырғаны, жалпы сипаттамалардың түріне айтарлықтай әсер етпейді. Тұтынатын токтан 3.8, б - суретте көрсетілген шамалардың тәуелділік ерекшеліктерін талдайық. Теңдеумен (3.22) ұқсас айналу жиілігінің теңдеуін жазамыз:

$$n = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{c_e \Phi}. \quad (3.27)$$

Жүктеме өзгергенде (I тұтынылатын ток өзгеруімен), қозғалтқыштың айналу жиілігінің негізгі өзгеру факторы Φ_0 магниттік ағын (яғни, қоздыру орамасының ағынымен анықталатын магниттік ағын) өзгерісі болып табылады. Қозғалтқышта қарастырылған қоздыру тогына тең тұтынатын ток ұлғайған кезде негізгі Φ_0 магниттік ағын ұлғаяды және сонымен бірге негізгі Φ магнит ағыны ұлғаяды, бұл теңдеуге сәйкес айналу жиілігінің төмендеуіне әкеледі (3.27).

Тұтынылатын ток көбейген сәтте, зәкір тізбегіндегі және қоздыру орамасында кернеу төмендейді ($I(R_a + R_b)$). Бұл фактор, сондай-ақ айналу жиілігінің төмендеуіне әсер етеді. Дегенмен, ток көбейген сәтте зәкір реакциясының магнитсіздендіру әсері ұлғаяды, бұл магнит ағынының өсуін баяулатады. Бұл белгілі бір дәрежеде кернеудің төмендеуіне әсер етеді (нәтижесінде, зәкір реакциясы болмаған жағдайдан гөрі, пайда болған ағын баяу өседі).

Жүйелі қоздыру қозғалтқышының айналу жиілігі тұтынылатын токқа тәуелділігі, кері пропорционалды тәуелділікке жақын болады (әсіресе, магниттік ағын негізгі токпен пропорционалды болғанда, машинаның магниттік жүйесінің болмашы толтырғанда): жүктеме ұлғайғанда айналу жиілігі өте жылдам төмендейді, ал бос жүріс кезінде жүктемені кеміткенде шексіз ұлғаяды («тоздыру» құбылысы орын алады). Айналу жиілігінің мұндай жүктемеге тәуелділігі параллельді қоздыру қозғалтқыш жағдайында орын алатын қатаң сипаттамаға қарағанда, *жұмсақ* деп аталады (3.4, б суретті қараңыз).

Жүйелі қоздыру қозғалтқышы арқылы тұтынылатын токтан айналу жиілігінің тәуелділігі, параллель қоздыру қозғалтқышының реттемелік сипаттамасына ұқсас болады (яғни айналу жиілігінің қоздыру тогына тәуелділігі), өйткені жүйелі қоздыру қозғалтқышында тұтынылатын ток қоздыру тогымен сәйкес келеді.

Айналу жиілігінің кенет жоғарылауын ескере отырып, жүктемені азайтқан кезде жүйелі қоздыру қозғалтқышы номиналдыдан 20...25% төмен жүктемеде, тіпті бос жүрісте де жұмыс істемеуі керек.

Теңдеуге (3.10) сәйкес, M қозғалтқыштың айналмалы кезі Φ магнит ағынына және I_a зәкір тогына пропорционалды болады (осы жағдайда тұтынылатын I токқа тең). Төмен жүктемелерде, машинаның магниттік тізбегі нашар қаныққан кезде, полюстердің магниттік ағыны қоздыру орамасының бойымен ағып жатқан ток үшін пропорционалды болады: $\Phi = kI$, мұнда k - пропорционалды коэффициент. Бұл жағдайда теңдеу (3.10) келесідей жазылу мүмкін:

$$M = c_m \Phi I = c_m k I^2, \quad (3.28)$$

яғни, аз қанығу кезінде айналмалы кезі ток шаршысына пропорционалды болады. Осы себепті $M(I)$ айналмалы кезінің қисық сызығының бастапқы бөлігі, сондай-ақ $M_2 = f(I)$ пайдалы иінкүшінің қисық сызығы параболаның формасына ие болады. Жоғары жүктемелерде магниттік жүйе көп мөлшерде қанығады, ағын жүктемеге аз тәуелді болады (дерлік тұрақты шама болып қалады) және айналмалы кезі тұтынатын токтың бірінші дәрежесіне пропорционалды болады. Сондықтан, үлкен жүктемелерде $M(I)$ және $M_2(I)$ қисық сызықтар тік сызықтарға жақын болады (3.8, б - суретте M_2 пайдалы иінкүшінің кестесі көрсетіледі, бірақ, бос жүріс иінкүшінің шамасына M_2 кестесінен жоғары мәнге өтетін M айналмалы кезі көрсетілмеген, (3.15) теңдеуді қараңыз).

UI көбейтіндісіне тең P_1 тұтыну қуаты, сызықты заңы бойынша тұтынатын токқа тәуелді болады, өйткені U кернеуінің қуаты сипаттамаларды алу үдерісінде өзгермейді.

Жүктеме өзгерген кезде пайдалы әрекет η коэффициентінің өзгеруі, барлық электр машиналарының жалпы сипаттамасы болады.

Жүйелі қоздырудың тұрақты ток қозғалтқыштары, елеулі іске қосу сәттерді қажет ететін немесе жиі шамадан тыс жүктеме пайда болатын құрылғыларда қолданылады. Теңдеуге (3.28) сәйкес магниттік жүйенің шағын қанықтылығымен жүйелі қоздыру қозғалтқышымен тұтынылатын ток айналмалы кезінің ($\sqrt{M}$). шаршы түбіріне пропорционалды болатының айта кету керек. Параллель қоздыру қозғалтқышында тұтынылатын ток (3.10) теңдеуге сәйкес, айналмалы кезінің бірінші дәрежесіне пропорционалды болып келеді. Демек, айналмалы кезі кенет өзгерген сәтте, тұтынылатын ток, сондай-ақ тұтынылатын қуаты параллель қоздыру қозғалтқышына қарағанда, жүйелі қозғалтқышта кенет ток секіруі аз болады.

Жүйелі қоздыру қозғалтқышты кері бұру үшін, параллель қоздыру қозғалтқыштың кері бұру әдісі қолданылады (3.5 бөлімін қараңыз).

Жүйелі қоздыру қозғалтқышының айналу жиілігін реттеу. Ол келесі жолдармен жүзеге асырылады:

- Реттеу реостатына қоздыру орамасын жүйелі қосу арқылы кернеуді өзгерту;
- қоздыру орамасына параллель реттеу реостатына қосу арқылы қоздыру тогының өзгеруі;
- қоздыру шарғысының пайдаланылған орамдар санын өзгерту арқылы қоздыру тогын өзгерту;

- Қозғалтқыштарды өзара қосу жолын өзгерту (екі немесе одан да көп қозғалтқышты бір уақытта пайдалану кезінде).

Аталған әдістерді егжей-тегжейлі қарастырайық.

Реттейтін реостатты қозғалтқышқа жүйелі қоссақ, онда қуат беретін кернеуді өзгерту арқылы айналу жиілігін реттей аламыз. Реостатты қосқан кезде кернеу, зәкір тогы және магнит ағыны бір уақытта азаяды. Теңдеуге сәйкес (3.22) кернеудің төмендеуі оның айналу жиілігінің төмендеу жағына қарай, ал ток пен магнит ағынның төмендеуі оның жоғарылау жағына қарай әсер етеді. Дегенмен, кернеудің өзгеруі анықтаушы фактор болады. Сонымен, қозғалтқышқа жүйелі түрде қосылған реостатты енгізу арқылы, айналу жиілігі төмендейді.

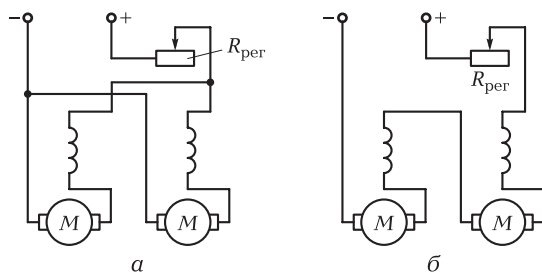
Егер, реттейтін реостатты қоздыру орамаға параллельді қоссақ, ток осы реостатқа бөлінеді; қоздыру орамасының тогы төмендейді, тиісінше магнит ағыны азайып, зәкірдің айналу жиілігі теңдеуге (3.22) сәйкес артады. Қоздыру орамасы мен реостаттың параллель қосындысының кедергісі қоздыру орамасынан төмен болады, ал қоздырғыштың зәкірінде ұлғаяды. Осылайша, осы әдісті қолданғанда пайда болатын кернеудің өзгеруі қоздыру тогының өзгеруімен дәл сол бағытта жиіліктің өзгеруіне әсер етеді.

Екі сипатталған әдістер қозғалтқыштың ПӘК төмендеуіне әкеледі.

Сондай-ақ, айналу жиілігін қоздыру орамдарын бөліп шығару арқылы реттеуге болады: ораманың жеке орамдарынан иілгіштер жүргізіледі және қуат көзінен өткізгішті әртүрлі иілгіштерге қосып, пайдаланылған шарғы орамдар санын өзгертеді. Пайдаланылған орамдар санын азайту магнит ағынының төмендеуіне, демек, айналу жиілігінің өсуіне сәйкес келеді.

Трамвайлар, метро локомотивтері, тартқыш крандар қондырғыларында бір уақытта бірнеше қозғалтқыштар жұмыс істейді. Егер қозғалтқыштар параллельді қосып (3.9, *a* - сурет) және $R_{\text{пер}}$ реттеуші реостатын өшірсе (яғни, оның кедергісіне нөлдік мәнін орнатсақ), онда қозғалтқыштардағы кернеу желі кернеуіне тең болады және айналу жиілігі ең жоғары болады. Қозғалтқыштар жүйелі түрде қосылса (сурет 3.9, *б*), қуат беру кернеуі екі есе азаяды. Реттейтін реостатпен қосымша реттеу жасалады.

Жоғары жүктемелерде айналу жиілігінің кенет төмендеуін, ал айналым жиілігі айтарлықтай ұлғаюын талап ететін көліктер мен көте-



3.9.-сурет. Қозғалтқыштарды қосу әдістері (іске қосатын және ауыстыратын құрылғылары көрсетілмеген):

a — параллельді қосу; *б* — жүйелі қосу

ру құрылғыларынан басқа жүйелі қоздыру электр қозғалтқыштары іштен жанатын қозғалтқыштарда стартер ретінде кеңінен қолданылады.

Аралас қоздыру қозғалтқышы. Егер, 3.4, *a* - суреттегі сұлбасын зәкір мен іске қосу реостат арасында қосылған жүйелі қоздыру орамасымен толықтырсақ, біз аралас қоздыру қозғалтқышының сұлбасын аламыз. Параллельді (шунтталған) орама бойымен I тұтынылатын ток пен $I_{\text{я}}$ зәкір тогына айырмашылығына, ал жүйелі (сериесті) орама бойымен $I_{\text{в.с}}$ зәкір тогына немесе I және $I_{\text{в}}$ токтар айырмашылығына тең ток өтеді.

Аралас қоздыру қозғалтқыштары параллельді және жүйелі қозғалтқыштардың сипаттамалары арасындағы аралық сипаттамаларға ие болады, бірақ екі қоздыру орамаларын *тиісті* қосу қажет, яғни олардың магнит ағындары бүктелетін болу керек.

Аралас қоздыру қозғалтқыштары қоздырудың екі режимінің артықшылықтарын пайдалану қажет болған жағдайларда қолданылады, атап айтқанда: іске қосу кезінде елеулі іске қосу сәтін және үлкен жылдамдықты алу қажет болғанда, бірақ жүктеменің өзгеруі мен айналу жиілігіне елеулі өзгеруіне жол беріледі. Атап айтқанда, электр қозғалтқыштарын, компрессорларды, металл кесетін станоктарды, роликті диірмендерді, көтергіш құрылғыларды, механикалық қайшыларды, престерді жүргізуге арналған. Қозғалтқыштың тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін параллель қоздыру қозғалтқышына тұрақтандырғыш ораманы орнату туралы 3.4-бөлімде айтылған, бұл аралас қоздыру қозғалтқышының басқа қолданысы туралы болған.

Жүйелі қоздыру қозғалтқышына қарағанда, аралас қоздыру қозғалтқышы бос жүріс режимінде жұмыс жасай алады, өйткені

параллель орамада параллель ағынның болуы, осы режимде айналу жиілігін шектейтінің ескеру маңызды (егер білікте жүктемені кемітсе, зәкір тогы өте төмен болады, ал параллель ораманың тогы азаймайды, себебі ол қоздырғыштың қуат көзінің кернеуімен анықталатынын еске саламыз).

Арнайы мақсаттарға байланысты, аралас қоздыру қозғалтқыштың сипаттамалары параллельді немесе жүйелі қоздыру сипаттамаларына сәйкес болуы мүмкін, ол үшін екі орамалардың орамдарының тиісті сандарын таңдау керек.

Айналу жиілігі параллельді қоздыру орамасының тізбегінде реостатпен реттеледі (3.5 - бөлімін қараңыз).

3.8. ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗДЫРҒЫШТАРЫНЫҢ ТЕЖЕУІ

Тежеудің үш электр әдістері қарастырылады: динамикалық, кері қосу және рекуперациялық. Барлық әдістерді бір ерекшелік біріктіреді: қозғалтқыш тежеу кезінде генератор режиміне өтеді. Бұл жағдайда электрмагниттік күштер зәкір орамасының өткізгіштер қозғалысына қарсы бағытталған (1.1-суретті қараңыз), сондықтан электрмагниттік иінкүш зәкір айналуына қарсы бағытталған болады.

Динамикалық тежеу. Тәуелсіз немесе параллель қоздыру айналмалы қозғалтқыштың динамикалық тежеу жағдайын жасау үшін, келесі қажет:

- қозғалтқыштың зәкірін қуат көзінен ажыратылуы керек және R кедергісімен кедергіге тұйықтау керек;
- қоздыру орамасын полярлықты өзгертпестен қуат көзіне қосып қалдыру.

Қозғалыс режимінде зәкір тогының бағыты қуат көзінің полярлығы бойынша анықталады, ал оның айналу кезінде зәкірге индукцияланған ЭҚК токқа қарсы бағытталады (қарсы ЭҚК (3.1 бөлімін қараңыз)). Зәкірді кедергіге ауыстырғаннан кейін, зәкір тогының бағыты ЭҚК бағытымен анықталады, ал ток өткізгіштің әр белсенді өткізгішіне әрекет ететін электрмагниттік күш сол қолдың ережесіне сәйкес бағытты өзгертеді. Сондықтан, айналмалы иінкүштен тежегіш иінкүшіне электрмагнитті иінкүштің де бағыты өзгереді. Тежеу үрдісінде электрмагниттік иінкүш ((3.10) теңдеуін қараңыз) азаяды.

Іс жүзінде, генераторлық режимде $I_{\text{я}}$ зәкір тогы индукцияланған ЭҚК анықталады. Тежеу кезінде ЭҚК азайғандықтан ((2.7) теңдеуді қараңыз), зәкір тогы және электрмагниттік иінкүш азаяды. Тежеу үдерісінде пайда болатын электр энергиясы R кедергіде жылуға айналады.

Динамикалық тежеу режиміне ауысу үшін, жүйелі қоздыру қозғалтқышында:

1) қуат көздеріне қосылатын сымдардың ұштарын, көздерінен ажыратып, R кернеуімен кедергіге қосу керек;

2) жүйелі қоздыру орамасына қосылған сымдардың ұштарын орындарымен ауыстыру қажет. Соңғысы зәкір тогының бағытын өзгерту кезінде, қоздыру орамасының магнит ағынының бағыты өзгергенде қажет.

Ауыстырудың екеуі де бір пакетті ауыстыру арқылы жүзеге асырылады.

Қозғалтқыштың динамикалық тежеу сәтінде, қоздыру орамасы параллель және тәуелсіз қоздыру кезінде сыртқы көзден қуат алады. Жүйелі қоздыру орамасында ток индукцияланған ЭҚК әсерінен ағып кетеді және қоздыру ағымы ЭҚК төмендеуімен азаяды.

Кері қосумен тежеу. Кері қосумен тежеу шарттары қозғалтқыштың айналу бағытын өзгерту шарттарына сәйкес келеді (кері бұру (3.5) бөлімді қараңыз). Терминологиялық айырмашылық, кері бұру қозғалтқыш тоқтағаннан кейін, ал тежеу айналу кезінде пайда болуымен қорытындыланады. Кері қосу тежеуді жүзеге асыру үшін қажет:

1) көзден қозғалтқыштың зәкіріне дейінгі сымдардың ұштарын ауыстыру;

2) полярлықты өзгертпестен қоздыру орамасын көзге қосып қою.

Қозғалтқышты кері қосумен тежеу режиміне ауыстырғанда, кернеудің қуаты полярлықты өзгертеді, ал индукцияланған ЭҚК бағыты өзгермейді, себебі ол айналу бағытымен анықталады. Осы жағдайларда зәкір тогы (3.19) теңдеуге сәйкес тең болады.

$$I_{\text{я}} = \frac{-U - E}{R_{\text{я}}} = -\frac{U + E}{R_{\text{я}}}.$$

Минус белгісі ток бағытының өзгерісін білдіреді. Ток шамасы, іске қосу ток шамасынан айтарлықтай асады ((3.20) теңдеуді қараңыз), сондықтан қозғалтқышты ауыстыру сұлбасы қуат көзі по-

лярлығының өзгеруімен бір мезгілде зәкір тізбегіне кедергісі бар кедергі шамамен 2 есеге дейін іске қосу реостатының кедергісін асатындай етіп жасалу тиіс (3.4 бөлімін қараңыз).

Қозғалтқыш тоқтағаннан кейін оны қуат көзінен ажырату керек, айтпесе айналу бағыты өзгереді (кері бұру).

Кері қосудың тежеуі - бұл ең тиімді, бірақ үнемді емес тежеу тәсілі, себебі қозғалтқыштың механикалық энергиясы мен қозғалтқышты іске қосу механизмнің төмендеуі қуат көзінің электр энергиясымен байланысты болады.

Рекуперативті тежеу. Тұрақты ток қозғалтқышының айналу жиілігі (3.22) теңдеуімен анықталады, ал I_{α} зәкір тогы біліктегі жүктемеге байланысты болады. Бос жүріс кезінде зәкір тогы аз болады, ал айналу жиілігі ең үлкен мәнге ие болады. Егер, қозғалтқыш білігіне айналу жиілігін одан әрі арттыратын сыртқы айналым иінкүшін қоссақ, онда зәкір тогы нөлге дейін төмендейді, содан кейін бағытты кері бұрады. Бұл қозғалтқыштың генератор режиміне ауысқанын білдіреді: қозғалтқыш теңдеуінің орнына (3.18), генератордың теңдеуі (2.4) ағымдағы белгі өзгерген кезде дұрыс болады.

Зәкір тогы нөлге тең болатын электр машинасының жұмыс тәртібі, қозғалтқыш пен генератордың режимдерінің арасында мінсіз бос жүріс деп аталады. Бұл режимде зәкір айналу жиілігі болады:

$$n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}. \quad (3.29)$$

Генератор режимінде машинаның электромагниттік иінкүші тежейтін болады: *рекуперативтік тежеу* деп аталатын (ағылшын тілінен recuperative — күшін қалпына келтіретін) қозғалтқыштың кинетикалық энергиясы және оның жұмыс істейтін механизмі жылу түрінде таратылмайды, бірақ қуат көзіне қайта оралады.

Рекуперативті тежеу электр тасымалдауда кеңінен қолданылады, атап айтқанда электр пойыздарында. Бұл тежеу әдісімен өндірілетін энергия басқа байланыс пойыздарына немесе жалпы энергия жүйесіне байланыс желісі арқылы тасымалданады.

Рекуперативті тежеу, сондай-ақ, түсіру кезінде жүк жылдамдығын азайту үшін, кран құрылғыларында қолданылады.

Электр көліктерінде рекуперативті тежеу арқылы шығарылатын энергия аккумуляторларды қуат беру үшін пайдаланылады.

Айтылғаннан электр тежеудің бұл тәсілі кез-келген тізбектің өзгеруін талап етпейтіні түсінікті. Осыған қоса, ол ең үнемді болады, себебі оның электр энергиясы қуат көзіне қайтарылады. Дегенмен, бұл әдіс тек қозғалтқыш мінсіз бос жүрістің айналу жиілігінен жоғары жиілікте айналғанда, әсіресе электр поезддің төмен қарай қозғалысында жүзеге асырылады. Дегенмен, поезддердің рекуперативті тежеуі қозғалыс жылдамдығын төмендетуге және көлденең нысандарда азайту үшін қолданылады. Осы мақсатта қозғалтқыштың қоздыру тоғын артады, бұл полюстердің магнит ағынының ұлғаюына әкеледі. Сонда, (3.22) тендеуге сәйкес қозғалтқыштың айналу жиілігі төмендеу керек. Бірақ бұл, көлік құралының массасы үлкен болуына байланысты, тез арада орындалмауы мүмкін, ал қозғалтқыштың айналу жиілігі бастапқыда мінсіз n_0 бос жүріс жиілігінен артық болады және қозғалтқыш генераторлық режимде жұмыс істейді, онда тежегіш электрмагниттік иінкүш жылдамдықты азайту үдерісті тездетеді.

Қарастырылған тежеу әдісі тәуелсіз және параллель қоздыру қозғалтқыштарына қолданылады. Жүйелі қоздыру қозғалтқышы бос жүріс режимде 3.7-бөлімде көрсетілгендей жұмыс істей алмайды (оның мінсіз бос жүріс жиілігі шексіздікке ұмтылады). Мұндай қозғалтқыштың рекуперативті тежеуін енгізу үшін, оның қоздыру қозғалтқышын параллель немесе тәуелсіз қоздыруға ауыстыру қажет, яғни бұл жағдайда сұлбалық өзгерту қажет.

3.9.

ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ АРНАЙЫ ТҮРЛЕРІ

Орындаушы қозғалтқыштар. Электрмеханикалық автоматтан-дырылған басқару және реттеу жүйелерінде, электрлік сигналды механикалық қозғалысқа айналдыру қажет болған жағдайда қолданылады - біліктердің айналуы. Мысал ретінде - өлшеу көпірінің өзін-өзі теңестіру тәсілі болу мүмкін. (Өлшеу көпірі электрлік кедергі, индуктивтілік, сыйымдылықты және электр тізбегінің басқа параметрлерін өлшеу құралы болып табылады). Көпірмен өлшеу кезінде оның тармақтарының біріне - өлшеу диагоналында - нөлдік кернеу

орнатылуы керек. Егер осы тармақтағы кернеу нөлге тең болмаса, онда ол күшейтіледі және жылжымалы байланысын қозғайтын механизмді іске қосатын орындаушы қозғалтқышқа беріледі; қозғалтқыштың айналу бағыты өлшеу диагоналында кернеудің полярлығы арқылы анықталады. Түйіспе өлшеу диагоналындағы кернеу нөлге тең болатын дәрежеге ауысады, өйткені осы уақытта орындаушы қозғалтқышқа электр қуатының берілуі тоқтайды. (Сандық өлшеу көпірлерінде орындаушы қозғалтқыш және қозғалмалы бөліктер болмайды; барлық операциялар электронды сұлбалармен орындалады.)

Орындаушы қозғалтқыштар – бұл төмен қуатты машиналар (ондаған және жүздеген ватт). Оларға қажетті талап - төмен инерция, демек, зәкірдің аз массасы болып табылады.

Дискілік зәкірі бар қозғалтқыш. Ең төмен қуаттың орындаушы қозғалтқыштарында аталған талап, зәкірді электр оқшаулағыш материалдың (мысалы, текстолит) жұқа дискісі түрінде жасалатын талаппен қанағаттандырылады. Дискінің екі жағында электрохимиялық әдіспен (баспа тақтасы сияқты) орама өткізгіштерін жүргізеді. Диск ось бағыты бойынша магниттік ағын қалыптастыратын позициялардың арасында ауысады. Коллектордың болмауы: щеткалар тікелей дискінің бетіне сырғиды.

Қуыс зәкірі бар қозғалтқыш. Зәкір инерциясын төмендетудің тағы бір әдісі - зәкір орамдарын және ауыр ферромагниттік өзегін бөлуімен қорытындыланады. Орама цилиндрлік тіректе жинақталады және пластикпен толтырылады (дискілік зәкір сияқты басылған орамалар да болу мүмкін). Орама бөліктердің ұштары кәдімгі қозғалтқыштағыдай коллекторлық тілімшелерге қосылады. Орамасымен қуыс цилиндрдің ішіне жылжымайтын ферромагниттік зәкір орналасқан. Қуыс зәкірі бар қозғалтқыштың статоры кәдімгі тұрақты ток қозғалтқышының статорларына ұқсас болады.

Қозғалтқышты айналдыруға қажет болған жағдайда, сигнал қолданылатын орындаушы қозғалтқыштың орамасы, басқару орамасы деп аталады. Осылайша, сол сияқты зәкір орамасы (әдеттегі қозғалтқышқа ұқсас) және полюстер орамасы әрекет ету мүмкін. Сәйкесінше, қоздыру орамасы полюстің орамасы немесе зәкір орамасы болуы мүмкін. Сонымен қатар, тұрақты магниттен қоздыру қолданылады.

Шұралы қозғалтқыштары. Щеткалар мен коллектор арасында сырғымалы байланыстың болуы, тұрақты ток қозғалтқыштарының маңызды кемшілігі болады. Біріншіден, коллекторды мерзімді таза-

лап және щеткаларды ауыстыру қажет. Екіншіден, қозғалтқыштың ең жоғарғы қуаты шектеледі. Үшіншіден, коллекторлық-щеткалы торабында ұшқын болу мүмкіндігі, жанғыш және жарылғыш орталарында, атап айтқанда, химиялық өндірісте коллекторлы қозғалтқыштарды, сондай-ақ бұрғылау қондырғыларын қолдануға мүмкіндік бермейді.

Айнымалы ток қозғалтқыштарының (асинхронды және синхронды) III-тарауда көрсетілген кемшіліктері болмайды. Дегенмен, соңғысы коллекторлы қозғалтқыштардың пайдалы қасиеттеріне ие емес, атап айтқанда кең ауқымда айналу жиілігін бірқалыпты реттеуге мүмкіндігі жоқ.

Шұралы қозғалтқыштардың құрылымы айнымалы ток қозғалтқыштарының және коллекторлы қозғалтқыштардың артықшылықтарын біріктіреді.

Көбінесе, зәкір орамасы жылжымайтын статорға орналастырылатын, ал қоздыру орамасы айналмалы бөлікке - роторға орналастырылатын қозғалтқыштың шұралы құрылымы пайдаланылады. (Статор және ротор функцияларын тарату көбінесе айнымалы ток машиналарында қолданылады).

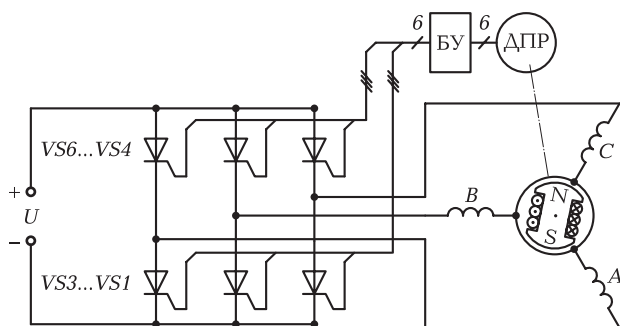
Қоздыру орамаларының ұштары, тұрақты ток кернеуінің көзінен щеткалар арқылы қуат берілетін түйіспелік сақиналарға қосылады. Осылайша, щетка түйіспесі қарастырылып жатқан машинада бар, бірақ біріншіден, қоздыру сұлбасы бойынша тұтынылатын қуат зәкір тізбегінің қуатынан бірнеше есе аз болады, ал екіншіден, коллекторға қарағанда түйіспелік сақиналар біртекті болып табылады; оларда коммутация болмайды, сондықтан іс жүзінде ешқандай ұшқын кездеспейді.

Статордың зәкір орамасы бірнеше бөліктерге бөлінеді. Бөліктер бір-біріне қатысты кеңістікте жылжытылған. Айнымалы токтың үш фазалы машинасының орамасына ұқсас статордың үш бөлікті орамасы 3.10-суретте көрсетілген.

Статор орамасы тұрақты кернеу көзіне басқарылатын *тиристор коммутаторы* арқылы қосылады, оның функциясы статор орамасының жекелеген бөліктері арқылы қажетті уақыт аралығында токтын өтуін қамтамасыз етеді.

Коммутатор сұлбасы басқарылатын тиристор түрлендіргіштің тізбегін қайталайды (3.6-суретті қараңыз).

Тиристор түрлендіргішімен қозғалтқышты басқаруға арналған сұлбадағы үш фазалы желі қуат көзі болып табылады және түрлен-



3.10.-сурет. Коммутатордың тәуелді басқаруымен шұралы қозғалтқышының сұлбасы.

діргіш түзеткіш функциясын орындайды, ал шұралы қозғалтқышының сұлбасында коммутатор статор орамасының бөліктері арқылы әр мезгілде ток ағымын қамтамасыз ететінде айырмашылығы болады. Бірінші аталған сұлбаның кіріс қысқыштары шығатын екінші қысқыштар болады және керісінше.

Тиристор *шұралы* болады, яғни тек бір бағытта ток өткізетін элемент (яғни, осы түрдегі қозғалтқыштардың атауы осыдан шыққан) болып табылады. Бірақ, алдын 3.6-бөлімдерде айтып келгендей, тиристор басқаратын кернеу импульсінің ішкі - бақылау - электродына қолданылған кезде ғана ток өтеді.

Басқаратын импульстер тиристорларға ауыспалы түрде кезекпен қолданылады, осылайша ток A , B және C зәкір орамаларының бөліктері арқылы кезекпен өтеді (басқару импульстерінің көзі кейінірек талқыланады). Нәтижесінде ағымдағы жүйе I_A , I_B , I_C үш фазалық жүйеге ұқсас болып қалады.

Статор орамаларының бөліктері бойынша токтардың кезекпен өтуіне байланысты, жылжымайтын статордың магнит өрісі айналмалы болады; ол роторды айналатын магнит өрісіне ұқсас болады (ол туралы толық анықтама 8.1-бөлімде берілген). Ротор, сондай-ақ электромагнитті ұсынады және статор өрісінің әсерінен ротордың солтүстік полюсі, үнемі статордың оңтүстік полюс (оның тартылуына байланысты) өрісіне қарай және кері бағытталады. Егер, ротордың бұрыштық жағдайына қарамастан, басқару сигналдары тиристорлардың коммутаторларына келіп түссе, шұралы қозғалтқышының қасиеттері синхронды қозғалтқыштың қасиеттерінен іс жүзінде ерекшеленбейді (13.1 бөлімін қараңыз) және тұрақты ток

машинасының артықшылықтары болмайды.

Егер тиристорларды жабық күйден ашық күйге ауысуы ротордың орналасуына байланысты болса, осы артықшылықтарды іске асыруға мүмкіндік болады. Коммутатор жұмысының тәуелділігін қамтамасыз ету үшін, *ротордың орналасу датчиктері* (РОД) қолданылады.

Ротордың орналасу датчиктері - тұрақты ток өткізетін орамасы бар ротордан және магниттік өріске сезімтал элементтерден тұратын құрылғы. РОД ротор шұралы қозғалтқышының роторымен бірдей білікке орнатылған және соңғысының қозғалысын қайталайды. Сезімтал элементтер түрлі қағидаларға негізделуі мүмкін.

Холл әсерін қолданылатын элементтер қолданылады.

Мұндай элемент шетінде электродтары бар жартылай өткізгіш тілімшені ұсынады. Ұзындық бағытта тілімше арқылы тұрақты ток өткізіледі. РОД роторы өзінің полюсімен тілімшеге бағытталған, оның магнит өрісі тілімшенің жазықтығын оған перпендикулярлы өтеді. Тілімше тогын тудыратын бос қуат тасымалдаушылар ротордың өрісінен электрмагниттік күш әсер етеді, оның бағыты сол қол ережесімен реттеледі.

Осы күштің әрекетінен қуат магнит өрісінің күш сызықтарына да, осы қуаттарды жасайтын ток бағытына да перпендикулярлы жылжиды. Демек, ток бағытына параллельді тілімшелер шеттерінің арасында потенциалдар айырмашылығы жасалады. Басқару сигналын қалыптастыру үшін басқарушы блокқа (ББ) жіберіледі, оның әрекетінен коммутатор тиристорларының бірі ашылады. Ротордың орналасу датчигінің сезімтал элементтер саны коммутатордың тиристорлар санына сәйкес келеді.

РОД жұмысының нәтижесінде шұралы қозғалтқышының орамасының бөліктерінде токтардың дұрыс таратылуы қамтамасыз етіледі.

Тиристорлы коммутаторлар жоғары қуатты шұралы қозғалтқыштарында қолданылады, себебі қуатты тиристорлардың үлкен тоқты (мыңдаған ампер) өткізуге шамасы бар. Орташа электр қозғалтқыштарында транзисторлардағы коммутаторлар қолданылады.

Шұралы қозғалтқыштарының айналу жиілігі, коллекторлы қозғалтқыштар әдісімен реттеуге болады. Бұл, атап айтқанда, тиристор коммутаторының қуат кернеуін реттеу арқылы жасалады.

Тұрақты ток қозғалтқыштарының арнайы түрлеріне, тұрақты магниттерден қоздыру қозғалтқыштарды қосуға болады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Магнит өрісіне орналастырылған ток өткізгішінің мысалында электр қозғалтқышының жұмыс қағидаларын түсіндіріңіз.
2. Қозғалтқыш қысқыштарында кернеу теңдеуін жазып алыңыз. Генератор қысқыштарында кернеу теңдеуінен немен ерекшеленеді?
3. Тұрақты ток қозғалтқышындағы коллектордың рөлі қандай?
4. Тұрақты токтың электромагниттік иінкүші қандай параметрлерге байланысты?
5. Қозғалтқыштың тұрақтылығы неге байланысты болады?
6. Іске қосу реостаттың рөлі қандай? Іске қосу реостатпен қозғалтқышты іске қосу рәсімін сипаттаңыз.
7. Параллель қоздырудың тұрақты ток қозғалтқышының іске қосудың басқа әдістері қандай?
8. Қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары деген не? Параллельді тұрақты ток қозғалтқышының жұмыс сипаттамалар түрін түсіндіріңіз.
9. Тұрақтандыру орамасының мақсаты қандай?
10. Параллель қоздыру қозғалтқышының тұрақты токтың кері бұруы қалай орындалады?
11. Зәкір тізбегіндегі реттеу реостат көмегімен параллель қоздыру қозғалтқышының айналу жиілігін реттеудің артықшылықтары мен кемшіліктері қандай?; қоздыру тізбегіндегі реттеу реостат арқылы; қуат беру кернеуді өзгерту арқылы?
12. Тұрақты ток қозғалтқышының реттемелік сипаттамасы деген не? Параллель қоздыру қозғалтқышының реттемелік сипаттамасының ерекшеліктері қандай және осы ерекшеліктер қалай түсіндіріледі?
13. Тұрақты ток қозғалтқышының тәуелсіз қоздыру әдістері қандай? Өздігінен қоздыру қозғалтқыш алдында тәуелсіз қоздыру артықшылықтары мен кемшіліктері қандай?
14. Жүйелі қоздыру қозғалтқыштардың жұмыс сипаттамаларын атаңыз?
15. Жүйелі қоздыру қозғалтқыштарының айналу жиілігі қалай кері бұрылады және реттеледі?
16. Аралас қоздыру қозғалтқыштар сипаттамаларының ерекшеліктері қандай? Аралас қоздыру қандай жағдайларда қолданылады?

17. Тұрақты ток қозғалтқыштарын тежеу әдістері қандай? Рекуперативті тежеудің артықшылығы қандай?
18. Орындаушы қозғалтқыштар конструкцияларының ерекшеліктері қандай?
19. Тұрақты ток коллекторлы ток қозғалтқыштар мен синхронды және асинхронды қозғалтқыштардың алдында шұралы қозғалтқыштарының артықшылығы қандай?

ТРАНСФОРМАТОРЛАР

II

БӨЛІМ

4-тарау. Трансформаторлардың әрекет қағидасы
мен құрылымы

5-тарау. Бір фазалы трансформаторлардың бос
жүріс режимі, жұмыс режимі және қысқа
тұйықталуы.

6-тарау. Үш фазалы генераторлар және олардың
параллель жұмысы

7-тарау. Арнайы трансформаторлар түрлері

ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ӘРЕКЕТ ҚАҒИДАСЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ

4.1. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ҚЫЗМЕТІ ЖӘНЕ ӘРЕКЕТ ҚАҒИДАСЫ

Трансформаторлардың қызметі. *Трансформатор* — бұл бір кернеулі айнымалы токты екінші кернеулі айнымалы токқа түрлендіруге немесе жеке жағдайларда, кернеу жиілігі мен сымдар санын түрлендіруге арналған, екі немесе одан да көп орамасы бар статикалық (айналмалы бөліктері жоқ) электромагнитті түрлендіргіш. Трансформаторлардың құрылымы мен міндеттері бойынша көп түрлері болады.

Қуатты трансформаторлар электр қуатын электр станциясынан тұтынушыға беру кезінде пайдаланылады. Электр станцияларында орналасқан генераторлар 10(35) кВ кернеуі кезінде электр қуатын өндіреді. Энергияны үлкен қашықтыққа үнемді тарату үшін, кернеуді 750—1 150 кВ дейін арттыратын көтеругіш трансформаторларды қолданады. Кернеу артқан кезде ток азаяды, себебі, трансформатор берілетін қуатты күшейтпейді (күшейткіш болып табылмайды), сондықтан, қажетті сымдардың қимасы азаяды, бұл металды едәуір үнемдейді. Тұтынушыларға электр қуатын бермес бұрын, кернеуді тағы да төмендету керек; бұл түсіруші трансформаторлармен орындалады.

Қуатты трансформаторлардан басқа, мәні үлкен айнымалы кернеуді өлшеуге арналған өлшеуіштік трансформаторлар, сондай-ақ, мәні үлкен айнымалы токты және де жоғары кернеулі желілерде токты өлшеу үшін қолданылатын, токтың өлшеуіштік трансформаторлары кеңінен таралған.

Арнайы трансформаторлар электрмен дәнекерлеу, доғал электр пештеріне қуат беру, кернеу жиілігі мен сымдар санын түрлендіру үшін қолданылады. Қуаты шағын трансформаторлар автоматика құрылғыларында, сондай-ақ, байланыс құралдары мен бұқаралық ақпарат жұмыстары кезінде қолданылады.

Кез келген трансформатор тұйық магнит өткізгішінің (білік) үстінде орналастырылған, электр машиналар орамаларының біліктері сияқты, жұмсақ магнитті ферромагнитті материалдан (электр-техникалық болаттан) жасалған екі немесе одан да көп орамадан тұрады.

Қуат көзіне қосылатын трансформатордың орамасы *бастапқы* орама деп аталады. Жүктемеге жалғанатын орама *екінші реттік* орама деп аталады. Аса жоғары кернеулі орама (бастапқы немесе екінші реттік орама) *жоғары кернеулі* (ЖК) орама деп аталады. Аса төменгі кернеулі орама — *төменгі кернеулі* (ТК) орама деп аталады. Егер, бастапқы орама ЖК болса, онда трансформатор түсіруші трансформатор деп аталады, кері жағдайда, көтеруші трансформатор болады. Орамалар мен магнит өткізгіштердің құрылымы 4.2. - тарауда толығырақ сипатталған.

4 және 5 - бөлімдерде ең алдымен, бір фазалы трансформаторлар қарастырылады.

Трансформатордың әрекет қағидасы. Генератор сияқты (1.1 - бөлімін қараңыз), ол электромагнитті индукция құбылысына негізделген, оның мағынасы – егер, кеңістіктің біршама аймағын өзгеремелі магнит ағыны өтсе, онда бұл аймақта *индукцияның ЭҚК* деп аталатын, электр қозғаушы күші пайда болады. Егер, өзгермелі магнит ағыны өткізгіш контурмен шектелген ауданын өтсе, онда бұл контурда ЭҚК индукциясының әрекет етуімен *индукциялық ток* пайда болады (бұл құбылыс сол мақсаттарға сәйкес, 1.1 -бөлімде қарастырылған).

Электр машинадағыдай, трансформаторда да, басқа орамамен жасалған магнит ағыны өзгерген жағдайда, бір орамадағы ЭҚК пайда болғандықтан, электромагнитті индукциясының жеке жағдайы – *өзара индукция* туралы айтады.

Мысалы, трансформатордың бастапқы орамасы, әрекет етуші U_1 белгісі бар айнымалы кернеу көзіне жалғансын, ал екінші реттегі орама ажыратылсын. Бастапқы орама бойынша Φ_1 магнит ағынын жасайтын, I_0 әрекет етуші белгісі бар айнымалы ток жүреді. Магнит өрісінің күш желісінің көп бөлігі, *негізгі Φ_0 магнитті орам* жасап, бастапқы және екінші реттегі ораманың орамдарын өтіп, магнит өткізгіші бойынша тұйықталады. Орама орамы арқылы магнит ағыны – бұл магнит өрісінің B индукциясының S айналма ауданының көбейтіндісіне (егер, магнит өрісінің күш желісі айналманың жазықтығына перпендикуляр болса) тең шама екенін еске саламыз.

Бастапқы ораманың тогымен пайда болған магнит өрісі күш желісінің аз бөлігі магнитсіз ортада, магнит өткізгішінен тыс тұйықталады және екінші реттегі ораманың орамдарынан өтпейді. Бұл күш желілері бастапқы ораманың Φ_{01} сейілту ағынын жасайды. Сейілту ағыны энергияны трансформаттауға қатыспайды.

Сонымен, бастапқы және екінші реттегі орамалардың барлық орамдары Φ_0 айнымалы магнит ағынымен өтеді. Онда, электромагнитті индукция заңына сәйкес, екі ораманың әр орамында, уақыттың әр мезетінде магнит ағынның өзгеру жылдамдығымен анықталатын, $e_{\text{вит}}$ ЭҚК индукциясы туындайды.

$$e_{\text{вит}} = -\frac{d\Phi_0}{dt}$$

(бұл өрнектегі минус белгісі Ленц заңына сәйкес екендігін еске саламыз).

Орамалардың орамдары өзара реттеліп жалғанған, сондықтан, әр ораманың ЭҚК орамдар ЭҚК сомасына немесе бір орамның ЭҚК орамдар санының көбейтіндісіне тең (ферромагнитті магнит өткізгіші болған кезде, әр орам бір ағынмен өтеді деп есептеуге болады):

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (4.1)$$

Бұл жердегі e_1 және e_2 — бастапқы және екінші реттегі орамалардың ЭҚК лездік мәндері; тиісінше w_1 және w_2 — орамаларының орамдар сандары болады.

e_1 ЭҚК-сы өзіндік индукцияның электр қозғаушы күші болып табылады, себебі, ол бастапқы орамадағы токтың өзгеру себебі болады және дәл сол орамада шығады.

Мысалы, негізгі магнит ағын синусоидалды болсын:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t \quad (4.2)$$

бұл жерде Φ_{0m} — магнит ағынның амплитудалық мәні; ω — ток пен магнит ағынының бұрыштық жиілігі.

(4.2) ағынның шамасын (4.1) теңдіктеріне қояйық және $\sin \omega t$ функциясынан уақыт бойынша $\omega \cos \omega t$ туындысы тең екенін есепке ала отырып, дифференциалдауды орындайық:

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_{0m} \sin \omega t)}{dt} = -w_1 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t; \quad e_2 = -w_2 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t.$$

e_1 және e_2 ЭҚК фаза бойынша Φ_0 негізгі ағыннан қаншалықты ерекшеленетінін білу үшін, тригонометриядан таныс (келтіру формулаларының бірі) келесі теңдікті пайдаланған ыңғайлы:

$$\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos \alpha,$$

бұл жерде α — біршама бұрыш.

Сондықтан,

$$e_1 = w_1 \omega \Phi_{0m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \quad e_2 = w_2 \omega \Phi_{0m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.3)$$

яғни, трансформатордың бастапқы және екінші орамаларының ЭҚК бір фазада орналасқан; сонымен бірге, олар фаза бойынша Φ_0 негізгі ағыннан $\pi/2$ бұрышына кейін орналасқан. (Бұл физикалық тұрғыдан, екі ЭҚК да негізгі ағынға қарағанда, өзінің максималды лездік мәніне ширек кезеңге кеш жететінін еске саламыз).

Келесі әрекет етуші E_1 ЭҚК және E_2 мәндерінің өрнектерін алу пайдалы.

Лездік мән жазбасындағы (оның ішінде, (4.3) өрнектеріндегі) тригонометриялық функцияның алдында тұрған көбейткіш синусоидалды өзгеруші шаманың амплитудасы болады:

$$E_{m1} = w_1 \omega \Phi_{0m}; \quad E_{m2} = w_2 \omega \Phi_{0m}. \quad (4.4)$$

Әрекеттік және амплитудалық мәндер арасындағы байланысты есепке аламыз:

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}}; \quad E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}}.$$

f жиілігі арқылы ω бұрыштық жиілікті көрсетеміз: $\omega = 2\pi f$. Соңында алатынымыз:

$$E_1 = \frac{w_1 2\pi f \Phi_{0m}}{\sqrt{2}}; \quad E_2 \text{ үшін ұқсас келеді.}$$

Сандық коэффициентті есептеумен, ЭҚК орамаларының әрекеттік мәндерінің келесі өрнегін аламыз:

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_{0m}; \quad E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{0m} \quad (4.5)$$

Көріп отырғандай, ЭҚК әрекеттегі мәндерінің қатынасы бастапқы және екінші орамаларының орамдар санына тең. Шамамен дәл осы бастапқы және екінші орамалар (U және U_2) кернеуі үшін орын-

далады:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

Келесі тарауларда трансформатор орамаларының шығу жерлеріндегі кернеу мәнінің ЭҚК сәйкес мәндерінен қалай ерекшеленетінін қарастырамыз.

Жоғары кернеулі $w_{\text{ВН}}$ орамасының орамдар санының ең төменгі кернеулі $w_{\text{НН}}$ орамасының орамдар санына қатынасы k трансформатордың *трансформаттау коэффициенті* деп аталады. Соңғы келтірілген теңдікке сәйкес, келесіні жазуға болады:

$$k = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} \approx \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}. \quad (4.6)$$

Трансформатордың екінші реттегі орамасы (ВН немесе НН орамалары) жүктемеге және осы орама бойынша жүктемеге қосылған кезде ток жүреді. Екінші реттегі ораманың айнаымалы тогының әрекеттегі мәні I_2 болып белгіленеді. Бастапқы орама тогының әрекеттегі мәні I_0 (бос жүріс кезіндегі токпен) салыстырғанда өседі және I_1 тең болады. Сонымен қатар, кернеу мен токтың әрекеттегі мәндерінің келесі болжамды қатынасы орын алады:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (4.7)$$

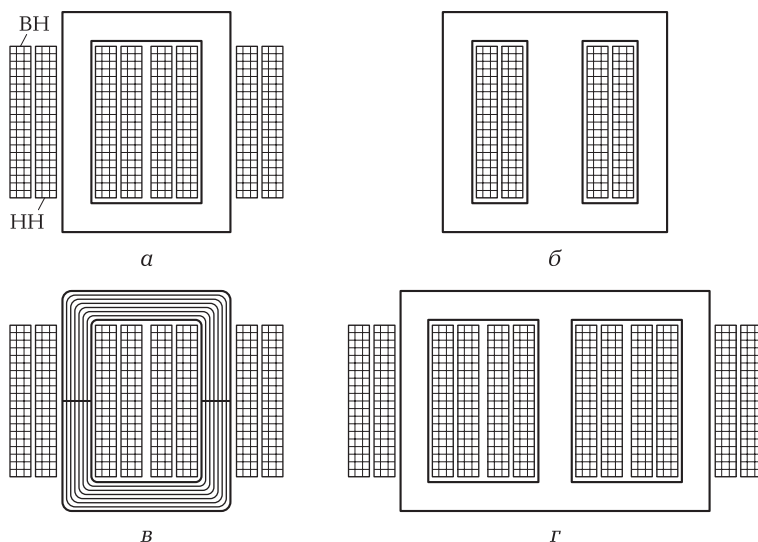
Әрі қарай бұл қатынас айқындалады.

4.2. МАГНИТ ӨТКІЗГІШТЕРІ МЕН ТРАНСФОРМАТОРЛАР ОРАМАЛАРЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ

Магнит өткізгіштерінің конструкциясы. *Магнит өткізгіш* (өзек) бастапқы және екінші орамалар арасындағы магниттік байланысты жақсартады. Ол трансформатордың магниттік тізбегін құрайды, оның бойымен негізгі магнит ағыны тұйықталады.

Орамалар орналасатын магнит өткізгішінің бөліктері *өзекшелер* деп аталады. Өзекшелерді жалғайтын магнит өткізгішінің бөліктері *жармалар* деп аталады (*жарма* жеке саны). Әр түрлі магнит өткізгіштері бар трансформатор құрылымының үлгілері 4.1.- суретінде көрсетілген.

Өзек тұрпатты бір фазалы трансформатордың магнит өткізгішін-



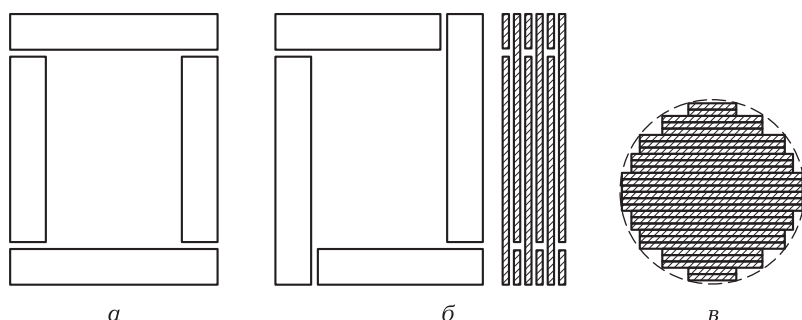
4.1.-сурет. Трансформаторлардың магнит өткізгіштерінің түрлері:
a — жалпақ тілімшелерден жиналған, магнит өткізгіші бар өзекше тұрпатты бір фазалы трансформатор; *б* — құрыш тұрпатты бір фазалы трансформатор; *в* — таспалы магнит өткізгіші бар бір фазалы трансформатор; *г* — үш фазалы трансформатор

де жоғарыда және төменде жармалармен жалғанған екі өзекшесі болады (4.1, *a* - сурет).

Әр өзекшеде ЖК орамасының жартысын және ТК орамасының жартысын орналастырады. Орамалардың осылай орналасуы олардың арасындағы магниттік байланысты жақсартады (үлгілерде әр ораманың өз өзекшесінде орналасуын шартты көрсетеді). Орамалар бір бірінен, сондай-ақ, магнит өткізгіштен қандай да бір оқшаулағыш материалдан жасалған қабатшалармен оқшауланған. Өзекшеге жақын жерде ТК орамасы орналасқан, себебі, оны магнит өткізгіштен оқшаулау жеңіл болады.

Магнит өткізгішінде айналмалы магнит ағыны кезінде пайда болатын және қызу кезінде көп шығынға әкелетін құйынды тоқты азайту үшін, магнит өткізгішті жуандығы шамамен 0,5 мм болатын электртехникалық болаттың жеке тілімшелерінен жинайды (яғни, дестелеген етіп жасайды). Тілімшелерді бір бірінен оқшалау үшін, оларға лак жағылады.

Біліктер мен жармаларды жеке жинап, содан кейін орамалардың өзекшелеріне орналастырып, одан кейін жоғарғы және төменгі жар-



4.2.-сурет. Магнит өткізгіштің құрылымы:

a — түйістірме; *б* — өзекшелер мен жармалар «түптеуге» жиналған; *в* — магнит өткізгіштің сатылы қимасы

маларды окшаулаушы қабаттар арқылы жалғағанда, магнит өткізгіштің түйістірме құрылымы болу мүмкін (рис. 4.2, *a*-сурет). Барлық құрылымды тығыздайды және тік түйреуіштермен тартып тастайды. Түйістірме құрылымы, өте үлкен тартпа құрылғылары мен түйісу жерлеріндегі магниттік кедергіні азайту үшін, түйісетін беттерде механикалық өңдеуді талап етеді.

Өзекшелер мен жармаларда «түптеуге» жиналған кемшіліктер магнит өткізгіште болмайды (4.2, *б* - сурет). Мұндай магнит өткізгіш, алайда, құрастыру қиындығымен ерекшеленеді: орамаларды өзекшелерге орнату үшін жоғары жармалар бөлшектенген болу қажет, ал орнатылғаннан кейін, қайта дестелену тиіс.

Көрсетілген құрылым қуатты трансформаторлар үшін аса танымал. Жармалар үстінен, екі жағынан жарма аркалықтарды (швеллерлер) орналастырады, олардың шеттерін өзара біліктердің мөлшерлерінен асатын, түйреуіштермен тартып тастайды.

Шағын және орта қуатты трансформаторлардың өзекшелері мен жармаларында тік бұрышты көлденең қима бар. Жоғары қуатты трансформаторлар магнит өткізгішінің элементтерін сатылы қылып жасайды (4.2, *в* - сурет). Сонымен қатар, орамалармен қамтылатын аудандардың магнитті емес аралықтардан кіші болуына талпынады. Бұл тұрғыдан қиманың ең жақсы пішіні — домалақ, бірақ, мұндай магнит өткізгішті жасау үшін тілімшелердің әр түрлі мөлшерлі түрлері қажет болады.

ЖК және ТК орамалар бөліктерге бөлінбейтін, бір өзекте орналасқан және жармамен қамтылған (құрышпен қапталған) құрыш тұрпатты бір фазалы трансформатор 4.1, *б* - суретте көрсетілген.

Құрышталған трансформатордың өзекшені түйрейтін магнит ағыны екі бөлікке тарайды, сондықтан, жарма өзекшеге қарағанда, екі есе кіші кимамен орындалады. Құрышталған трансформаторда өзекшеге қарағанда, орамаларды суытудың кіші ауданы бар және де ол сыртқы магнитті ағындарды сезгіш (өзекшелі трансформатор орамасының екінші бөліктерінде болатын сыртқы кедергілердің ЭҚК қарама-қарсы белгілері бар және бір бірін алмастырады). Құрышталған трансформаторларда ЖК орамаларды магнит өткізгіштен оқшаулау кезінде қиындықтар туындайды. Құрышталған болып аз қуатты трансформаторлар жасалынады.

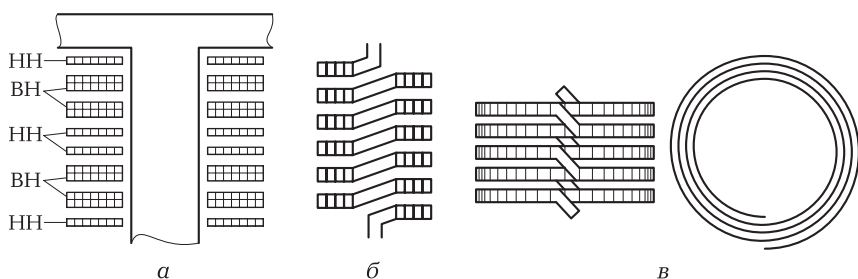
Аз қуатты трансформаторлардың магнит өткізгіші ($1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ дейін) суық иленген электртехникалық болаттың жіңішке таспасынан (4.1, в - сурет) жасалынады. Т а с п а л ы магнит өткізгіштерді кесілетін етіп жасайды. Орамаларды орнатқаннан кейін оларды қысып біріктіреді және қамыттармен тартып тастайды. Таспалы магнит өткізгіштері өзекшелі, сондай-ақ, құрышталған тұрпатты болады.

Ү ш ф а з а л ы т р а н с ф о р м а т о р д ы ң құрылымы 4.1, г - суретте көрсетілген. Әр білікте жеке фазаның ЖК және ТК орамасы бар. Үш фазалы трансформаторлардың құрылымы туралы толық ақпарат 6.1- бөлімде бар.

Аса қуатты трансформаторлардың магнит өткізгіштерінде тілімшелер беттеріне параллельді және перпендикулярлы беттерде желдету арналарын орнатады, олардан магнит өткізгіштер құрастырылған. Желдету арналарын орамаларда орнатады.

Трансформаторлар орамаларының құрылымы. Жоғарғы қуатты трансформаторлардың орамалары тік бұрышты қималы сымнан жасалады. Басқа жағдайларда, дөңгелек қималы сымдарды пайдаланады. Үлкен токтарға орамаларды жасау үдерісін жеңілдету үшін дөңгелек қималы сымдардың параллельді жалғануын пайдаланады. Сымдар мақта-маталық иірімжіппен немесе сым қағазбен оқшауланады. Орамаларды көбінесе мақта-бакелитті цилиндрде орналастырады. Механикалық және электрлік беріктікті қамтамасыз ету үшін бұл цилиндрге тактайша, бұрыштық шайба және басқа да элементтерді бекітеді. Магнит өткізгіште орналасу тәсілі бойынша, орамалар дисктік және шоғырлы болып бөлінеді.

Тек қана кейбір арнайы қызметті трансформаторларда қолданылатын д и с к т і к (кезектесетін) о р а м а л а р бірдей диаметрлі жеке диск тәріздес шарғылардан жасалады. Сонымен қатар, жоғары кернеулі шарғылар (орамалардың бөліктері) ең төменгі кернеулі шарғы-



4.3.-сурет. Орамалардың кейбір түрлері:
a — дисктік; *б* — бұрандалы; *в* — шиыршықты

лармен кезектесіп отырады (4.3, *a* - сурет).

Шоғырланған орамаларды цилиндрлер ретінде симметрияның жалпы осьпен бір-бірінің үстіне (мұндай орамалар 4.1 - суретте көрсетілген) орналастырып орындайды. Шоғырланған орамалар, өз кезегінде, цилиндрлік, бұрандалы және шиыршықты болып бөлінеді.

Цилиндрлік орамадағы орамдар бір біріне тығыз оралады. Әр айналым бір немесе одан да көп параллельді өткізгіштерден тұрады. Орамдар көп болған жағдайда, орамалар шоғырланған шарғылардың екі немесе одан да көп санына бөлінеді, бұған қоса, шарғылар арасында (орамалар қабаттарының арасында) тік салқындатқыш арналарды қалдырады. Ең алдымен, мұндай орамаларды, 35 кВ дейінгі кернеуге ЖК орамасы ретінде қолданады.

Бұрандалы орама құрамында (4тен - 20 дейін) тік бұрышты киманың бірнеше параллельді өткізгіштерін қосатын орамдардан тұрады. Сонымен бірге, параллельді жалғанған өткізгіштер шоғырланған түрде орналасады (4.3, *б* - сурет). Сымды цилиндрлі орама жағдайындағыдай, бұрандалы сызық бойынша орайды, бірақ, биіктігі бойынша орамдар арасында суытуға арналған көлденең арналарды қалдырады. Жеке параллельді өткізгіштер концентрлі түрде орналасқандықтан, олардың ұзындықтары және де белсенді кедергілері әр түрлі болады. Бұдан басқа, бұл өткізгіштер сейілту магнит ағынына қатысты, әр түрлі жағдайда орналасады (4.1 - тарауды қараңыз). Нәтижесінде, бір орамның жеке параллельді өткізгіштеріндегі ток әр түрлі мәнге ие болады. Сонымен бірге, трансформатордағы шығындар артады. Мұны болдырмас үшін, параллельді өткізгіштердің әрқайсысы орамадағы барлық орындарға алма-кезек орналасатындай етіп (яғни, бірде ішінде болса, бірде аралық орын-

дарда, біресе сыртында болады), айналым өткізгіштерінің транспозициясын (ауыстырып салу) орындайды. Транспозиция трансформатордың биіктігі бойынша, бірнеше орындарда жасалады. (4.3, б - суретте транспозиция көрсетілмеген.)

Бұрандалы орамалар цилиндрлік орамаларға қарағанда, ең үлкен механикалық беріктікке ие. Олар 300 А көп токтар кезінде ТК орамалар ретінде пайдаланылады.

Шиыршықтық орама құрылғысының сызбасы 4.3 в - суретте көрсетілген. Мұндай орама біліктің биіктігі бойынша кезек-кезек жалғанған шарғылар ретінен тұрады. Әр шарғыда жалпақ шиыршық түрі бар. Жеке шарғылар арасында көлденең суытқыш арналар қалдырылған. Әр орам бір өткізгіштен немесе бірнеше параллелді өткізгіштерден тұруы мүмкін. Соңғы жағдайда, өткізгіштердің транспозициясын қолданады. Шиыршықты орамаларды кернеулердің кең аралығында (220 кВ дейін және одан жоғары) ЖК және ТК орамалары ретінде пайдаланады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Трансформатордың жұмыс қағидасы неге негізделген? Неге трансформатордың кез келген орамасының орамдарында ықпалдандырылған ЭҚК мәндерін тең деп санауға болады?
2. Трансформатордың негізгі магнит ағыны және сейілтудің ағыны деген не?
3. Трансформатор орамының ЭҚК қандай параметрлермен анықталады?
4. Трансформатордың трансформаттау коэффициенті қалай анықталады? Жоғары және төменгі орамалардың кернеулері мен токтарының қатынасы қандай?
5. Өзекше және құрыш тұрпатты трансформаторлар магнит өткізгіштерінің артықшылықтары мен кемшіліктері қандай? Қандай жағдайларда осы тұрпаттың магнит өткізгіштері пайдаланылады?
6. Трансформаторлардың қандай орамалары болады? Әр түрлі тұрпаттағы орамалардың ерекшеліктері қандай?

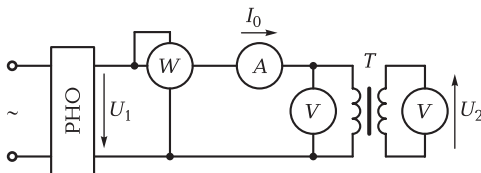
БІР ФАЗАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАР- ДЫҢ БОС ЖҮРІС РЕЖИМІ, ЖҰМЫС РЕЖИМІ ЖӘНЕ ҚЫСҚА ТҮЙЫҚТАЛУЫ

5.1. ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ БОС ЖҮРІС РЕЖИМІНІҢ ТӘЖІРИБЕСІ

Бос жүріс режимнің түсінігі. *Трансформатордың бос жүрісі* (ХХ) – бұл оның ашық екінші реттік орамада жұмыс істеу режимі. Осы режимде екінші орама тогы нөлге тең болады: $I_2 = 0$; бастапқы ораманың тогы бос жүріс тогын ұсынады: $I_1 = I_0$. Қуатты трансформаторлар үшін (1000 кВ·А және одан жоғары) бос жүріс тогы номиналды токтың 0,5% -ын құрайды ($I_0 = 0,005I_{\text{ном}}$) немесе одан аз; қуаты шамамен 25 кВ·А трансформаторлар үшін, бос жүріс тогы номиналды токтың шамамен 3% -ын құрайды; төмен қуатты трансформаторлар үшін бос жүріс тогы номиналды токтың 30 % дейін және одан көп болады. (Трансформатордың номиналды ток және номиналды параметрлері трансформатор қыздыру жағдайларына сәйкес есептелетін параметрлер болып табылады).

Трансформатордың *бос жүріс тәжірибесі* (5.1-сурет) трансформация, бос жүріс тогының, бос жүріс шығындар қуатының және бос жүріс кедергілерінің (осы шамалардың мағынасы кейінірек түсіндіріледі) коэффициентін анықтау үшін орындалады.

Желі кернеуі, реттелетін автотрансформатор болып табылатын бір фазалық кернеу реттегішіне (БКР) жеткізіледі (7.1 - бөлімін қараңыз).



5.1.-сурет. Бір фазалы трансформатордың бос жүріс тәжірибесінің сұлбасы.

Бастапқы орамада U_1 кернеуінің шартты түрде таңдап алынған оң бағыты 5.1-суретте көрсеткішпен көрсетілген. Бос жүрісте трансформатордың параметрлерін анықтау үшін U_1 кернеу, әдетте номиналды $U_{\text{ном}}$ кернеуге тең болады. Бастапқы орама ретінде әдетте төменгі кернеу орамасы таңдалады, өйткені бұл ораманың жүкте-мелік тогы жоғары, сондықтан ол дәлірек өлшенеді.

Номиналды токпен салыстырғанда ХХ ток аз болғандықтан (бұл тәжірибелік факт деп қарастырылады), онда бастапқы ораманың кедергісінде кернеудің төмендеуі аз болады, содан кейін Кирхгофтың екінші заңына сәйкес жазуға болады:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 \approx 0; \underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1 \quad (5.1)$$

яғни берілген кернеу бастапқы Φ_0 магнит ағыны (осы қатынастар одан әрі нақтыланатын болады) арқылы индукцияланатын ЭҚК өтейді.

Екінші реттік орамадағы кернеуде ток болмаған жағдайда осы орамадағы негізгі магнитті ағынмен туындаған ЭҚК тең болады:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 \quad (5.2)$$

бос жүріс режимінде электр қуат көзінің ЭҚК көздеріндегі кернеуге сандық түрде тең болатындығына ұқсас

Содан кейін, бастапқы және екінші орамаларға байланысты вольтметрлер бойынша, трансформатордың формуласын (4.6) пайдаланып трансформация коэффициентін анықтауға болады. Үш фазалы трансформатордың трансформация коэффициенті 6.1-бөлімде талқыланады.

Ескерту. Формулаларда (5.1), (5.2) және төменде, ток және басқа шамалардың тиімді мәндері мен синусоидалды ЭҚК фазалық бұрыштары туралы ақпаратты қамтитын *күрделі шамалар* асты сызып белгіленген. Графикалық күрделі шамалар векторлар ретінде ұсынылады, ал осы векторлардың модульдері белсенді мәндермен пропорционалды болады, ал векторлар арасындағы бұрыштар фаза айырмашылығының бұрыштарына сәйкес келеді.

Теориялық электротехникада қарастырылған синусоидалды сандардың күрделі көрінісін қайталамай, біз визуалды векторлық көріністерге сүйенеміз. Естеріңізге сала кетейік, 2 шамасынан 1 шамасының фаза бойынша $\pi/2$ -рад дейін артта қалуы, 2 шамасына сәйкес келетін векторға қатысты *сағат бағытымен* $\pi/2$ рад (90°) бұрышына 1 шамасына сәйкес ке-

летін вектордың айналуымен көрсетілген. Күрделі (5.1) және (5.2) түрлердегі шамалармен өрнектерді *векторлық теңдік* ретінде қарастыру ыңғайлы.

Трансформатордың бос жүріс режимінде магниттік тізбектегі айнымалы магнит өрісі бастапқы ораманың *магнит қозғаушы күшімен* (МҚК) магнит өткізгіште қоздырылады: $F_0 = I_0 w_1$. Магнит қозғаушы күші *магниттеу күші* (МК) деп аталады. Бастапқы ораманың магниттік сызықтарының көп бөлігі Φ_{0m} амплитудасы бар негізгі магниттік Φ_0 ағынын құрайды.

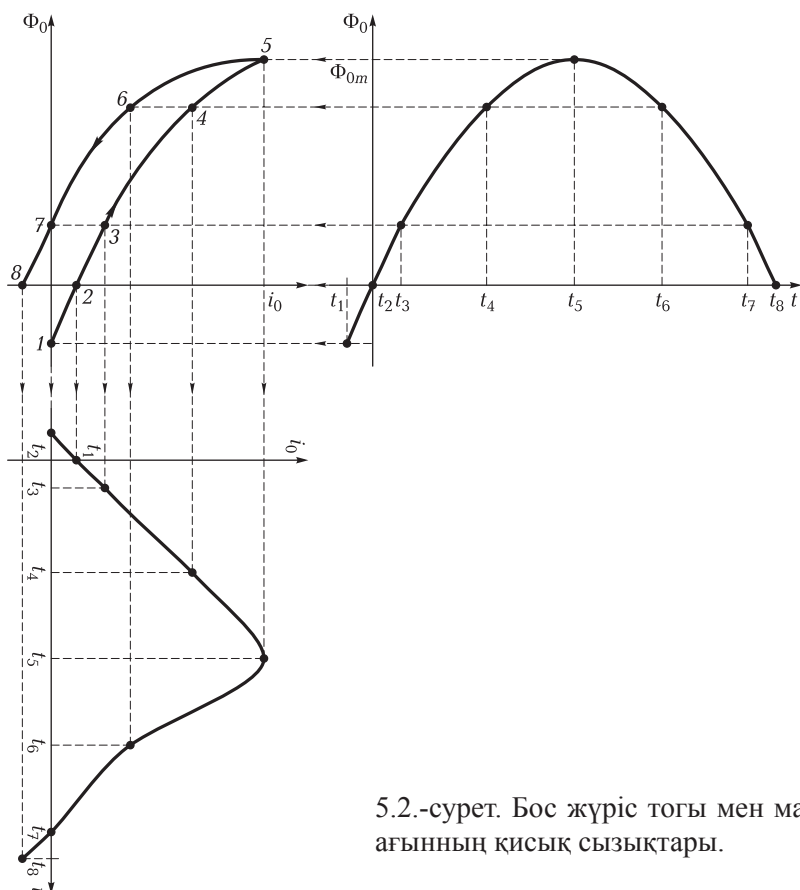
Уақытқа тәуелді бос жүріс тогының кестесін құру. Бос жүріс i_0 тогының лездік мәні өзгерген кезде, Φ_0 магниттік ағын оған пропорционалды өзгермейді. *Гистерезис ілмектер* түрі бар магнит өткізгіш материалының *магниттік сипаттамасы* арқылы анықталады. Магниттік сипаттамасының бөлігі, яғни $\Phi_0(i_0)$ тәуелділігі 5.2 - суретте көрсетілген. Аралықта $\Phi_0(t)$ уақытынан магнит ағынның тәуелділігі кезеңін жартысынан үлкені оң жақта берілген (ағын синусоидалды өзгереді, егер берілген кернеу синусоидалды болса, орама ЭҚК мен оның кернеуіне шамалаған теңдігін есептеумен (4.3) өрнегіне тиесілі болады). Уақыттың есептеу басы $t = t_2 = 0$ ағымның лездік мәні нөлге тең болған сәтте біріктіріледі. $i_0(t)$ уақытындағы бос жүріс токтың тәуелділігінің сызбасы $\Phi_0(t)$ және $\Phi_0(i_0)$ кестелерінен келтірілген.

$\Phi_0(t)$ және $i_0(t)$ кестелерінің уақыт осьтерін жоспарлаудан бұрын, $t_1 \dots t_8$ уақыттың сол нүктелері белгіленеді. $\Phi_0(i_0)$ кестесінде осы сәттерге сәйкес келетін 1...8 нүктелері белгіленеді.

Таңдалған t_1 уақытта сілтеме бойынша теріс мән беріледі, Φ_0 ағыны теріс болып табылады және $\Phi_0(i_0)$ сызығынан көрініп тұрғандай, ағымдағы i_0 нөлге тең келеді. $i_0(t)$ кестесінде ағымның t_1 уақытындағы нөлдік мәні көрсетіледі. $t_2 = 0$ уақытында ағынның нөлдік мәні бар, ал ток – оң болады. Кейде t_3 және t_4 ағымдары нөл мен максимум аралығында аралық мәндерді алады. $\Phi_0(i_0)$ графикасында осы нүктелер шығу бөлімдерінде 3 және 4-тармақтарына сәйкес келеді. t^5 сәтте ағын Φ_{0m} ең үлкен мәнді алады. Осы сәтте ағым барынша көп болады.

Сонымен қатар, магнит ағынының лездік мәні азаяды. t_7 уақытында ағын қалдық мәніне ие болады; осы уақытта ток нөлге тең. Ақырында, t_8 ағымы нөлге тең болғанда, ток теріс болады. t_8 уақытынан бастап ағын бағытты өзгертеді (теріс болады) және оның абсолюттік мәні артады; Ағынның абсолютті мәні амплитудалық мәнге дейін артады.

Алынған $i_0(t)$ графиканы $\Phi_0(t)$ графикасымен салыстыру арқылы



5.2.-сурет. Бос жүріс тогы мен магнит ағынның қисық сызықтары.

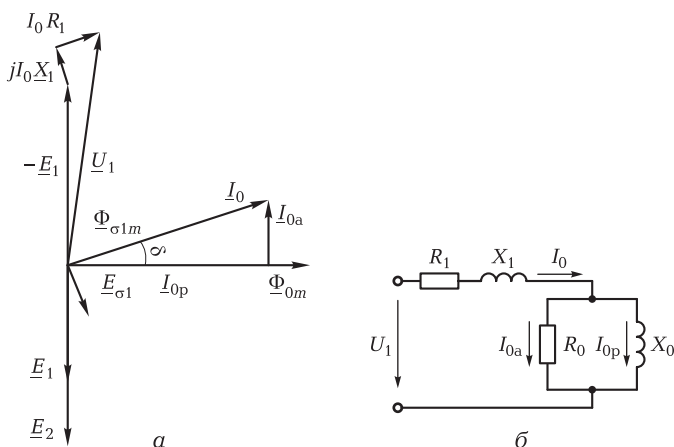
ток нөлдік мәндерді магнит ағынан бұрын алынатының көрсетеді. Басқа сөзбен айтқанда, ток магнит ағынының уақытпен асып кетеді, сонымен фазамен де асады. Дегенмен, құрылымнан көріп отырғандай ағым синусоидалдық шамасы емес, фаза бойынша асып кету тұжырымдамасын қатаң айтқанда, тек синусоидалдық шамаларға қатысты қолданылады. Мұндай жағдайларда нақты мерзімді шамасы бірдей тиімді мәнге ие, сондай синусоидалды әрекет ететін мәніне ауыстырылады. Бос жүріс тогының эквивалентті синусоидасы, біраз Δt уақыт бойы ағынның синусоидыдан шығып кетеді (ол Δt_{12} уақыт интервалына сәйкес келмейді, $(t_2 - t_1)$). Фазалық ілгерілеу, *гистерезис алға жылжу* бұрышы немесе *магниттік кешігу* бұрышы («алға жылжу» сөзі токқа және «кешігу» сөзі магнит ағынына қатысты) деп

аталатын $\delta = \omega \Delta t$ рад рад бұрышымен белгіленеді. Эквивалентті ток синусоидасы сол Δt уақытына синусоид ағынынан бұрын ең жоғары мәнге жетеді.

Бос жүріс режиміндегі трансформатордың векторлық диаграммасы. 5.3, а-суретте XX-гі трансформатордың векторлық диаграммасы көрсетілген. Ол негізгі магнит ағынына қатысты бос жүріс ток ағымын көрсетеді: I_0 ток векторы δ бұрышына сағат бағытына кері, негізгі Φ_m ағынның векторына қатысты бұрылған. I_0 екі вектор құраушысына бөлінген: негізгі магнит ағынын құраушы және магнит ағынының векторымен бағытталған I_{0p} реактивті құраушы және белсенді I_{0a} құраушы, *гистеризстен магнитті шығындармен* (бұл ұғым алдын қарастырылған) және одан басқа *құйынды токтардан* негізделген.

Ескерту: кешенді ЭҚК, кернеу және ток жоғарыда аталғандай, модульдері осы шамалардың әрекеттік мәндеріне сәйкес векторлармен көрсетілген. Алайда, магнит ағынының вектор модулі оның амплитудасына сәйкес келеді, өйткені ағынның әрекеттік мән ұғымы пайдаланылмайды.

(4.2) және (4.3) өрнектеріне сәйкес, бастапқы және екінші реттегі орамалардың ЭҚК негізгі магниттік ағыннан $\pi/2$ рад артта қалады, сондықтан E_1 және E_2 векторлары $\pi/2$ сағат тілімен Φ_{0m} векторына қарай бұрылған (НН орамасы бастапқы орама ретінде таңдалған, сондықтан E_1 әрекеттік мәні E_2 әрекеттік мәнінен аз).



5.3.-сурет. Трансформатордың бос жүріс режимінің графикалық бейнесі: а — векторлық диаграмма; б — трансформаторды ауыстыру сұлбасы

Жуық теңдікке (5.1) сәйкес, U_1 қуат көзінің кернеу векторы E_1 ЭҚК векторына қарама-қарсы болу (π рад бұрышына жуық оған қатысты бұрылған) тиіс. Осы мәлімдемені түсіндірейік.

Бұл үшін, алдымен, трансформатордың магнит қозғалтқышы бойынша тұйықталатын $\Phi_{\sigma 1}$ негізгі магнит ағынымен қатар пайда болған, Φ_0 бастапқы ораманың сейілу ағыны түсінігін еске түсірейік. Сейілу $\Phi_{\sigma 1}$ ағыны тек бастапқы ораманың орамдарын өткізеді, магниттік емес ортада тұйықталады және энергияның трансформациясына қатыспайды. Магниттен тыс өткізілмейтін ортада гистерезис және құйынды токтар болмайды, сондықтан сейілу ағымына қатысты бос жүріс ток фазасында ешқандай озу болмайды. $\Phi_{\sigma 1}$ магнит ағынымен I_0 ток фазасы бойынша сәйкестік векторлық диаграммада көрсетілген.

Негізгі ағын E_1 және E_2 трансформатор орамдарында индукцияланады. Содан кейін, *сейілудің ЭҚК* деп аталатын, сейілу ағыны $E_{\sigma 1}$ ЭҚК бастапқы орамасында индукцияланады. Лездік мәндері электр-магниттік индукция (4.1) заңымен, Φ_0 негізгі ағынының e_1 және e_2 ЭҚК лездік мәніне байланысты болады. Сол сияқты, $e_{\sigma 1}$ сейілудің ЭҚК лездік мәні $\Phi_{\sigma 1}$ сейілу ағынымен өрнекке байланысты болады

$$e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt}.$$

Теңдеулер (4.1) негізінде, E_1 және E_2 ЭҚК $\pi/2$ рад негізгі ағыннан артта қалды деген тұжырымға келді ((4.3) өрнектерді қараңыз). Бұл жағдайда, $E_{\sigma 1}$ сейілу ЭҚК сейілу ағынынан $\pi/2$ рад артта қалғаны 5.3, *a*-суретте көрсетілген.

Сонымен қатар, бастапқы ораманың $I_0 R_1$ кернеуінің төмендеуі бар белсенді қарсыласуына ие екендігін ескеру керек.

Бастапқы орама белсенді кедергіде кернеудің төмендеуін және сейілу ЭҚК есептеумен өрнекте жазылған Кирхгофтың екінші заңы бойынша келесідей нақтылану керек:

$$\underline{U} + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = I_0 R_1 \quad (5.3)$$

Е с к е р т у : *тасқын ілінісі* ұғымын еске түсіргеніміз дұрыс болады. Белгілі болғандай, электр тогы магнит өрісін тұдырады. Егер ток шарғы арқылы ағып кетсе, осы токтың магнит өрісі шарғының орамдары арқылы өтіп, Φ магниттік ағынын қалыптастырады. Егер шарғының w орамдары болса, онда тасқын ілінісі $\Psi = w\Phi$ болады. Тасқын ілінісі шарғы бойымен өтіп жатқан токқа пропорционалды болады. Пропорционал-

дық коэффициенті шарғылардың қасиеттерін сипаттайды және оның *индуктивтілігі* L деп аталады: $\Psi = LI$ деп аталады. Сейілу ағынының амплитудасы арқылы ЭҚК сейілудің амплитудасы үшін, (4.4) өрнектеріне ұқсас өрнек жазайық:

$$E_{\sigma 1m} = w_1 \omega \Phi_{\sigma 1m} = \omega \Psi_{\sigma 1m}$$

мұндағы $\Phi_{\sigma 1m}$ — сейілу ағынның амплитудасы; $\Psi_{\sigma 1m}$ — сейілудің тасқын ілінісінің амплитудасы, $\Psi_{\sigma 1m} = w_1 \Phi_{\sigma 1m}$.

Жазбада көрсетілген өрнекке сәйкес келесідей жаза аламыз:

$$\Psi_{\sigma 1m} = L_{\sigma 1} I_{0m}$$

мұндағы $L_{\sigma 1}$ — сейілу ағынымен негізделген ораманың толық индуктивтілігі (бұл шарғылардың жалпы индуктивтілігі емес, тек оның аз бөлігі).

Осы жағдайда сейілудің ЭҚК амплитудасы келесідей болуы мүмкін:

$$E_{\sigma 1m} = \omega L_{\sigma 1} I_{0m}$$

ЭҚК мен токтың әрекеттегі мәндеріне ауысқанда, $E_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} I_0$ пайда болады. Электротехника курсынан, шарғының индуктивті кедергісі бұрыштық жиілік пен индуктивтілікке тікелей пропорционалды екені белгілі: $XL = \omega L$, сонымен бастапқы ораманың сейілу ЭҚК келесі түрде жазылу мүмкін:

$$E_{\sigma 1} = I_0 X_1 \quad (5.4)$$

мұндағы X_1 — сейілу ағынымен негізделген ораманың толық индуктивтілігі (сейілудің индуктивті кедергісі).

Трансформатордың бастапқы орамасының индуктивті кедергісі негізгі магниттік ағынымен негізделгенің атап өтейік. Индуктивті сейілу кедергісі едәуір аз сандық мәнге ие. Оны $X_{\sigma 1}$ деп белгілеу керек еді, бірақ дәстүрге сай, біз осы белгіден « σ » белгісін шығарамыз.

Сондай-ақ, X_1 шамасын оның байланысын сейілу ағынымен көрсетпей, көбінесе бастапқы ораманың индуктивті кедергісі деп атайды.

Шамалар модулі үшін (5.4) теңдеу жазылған. Енді фазалардың айырмашылықтары туралы мәселені қарастырайық. Осыдан бұрын, $E_{\sigma 1}$ сейілудің ЭҚК-нен $\Phi_{\sigma 1}$ -нің сейілу ағыны $\pi/2$ -рад артта қалғаны анықталған еді. Сейілу ағыны фаза бойынша I_0 бос жүріс тогымен сәйкес келгендіктен, $E_{\sigma 1}$ фаза бойынша $\pi/2$ рад ЭҚК-нен артта қалады. Осыған сәйкес, (5.4) формуланың орнына келесі өрнекті жиынтық сандармен жазуға болады:

$$\underline{E}_{\sigma 1} = j I_0 X_1 \quad (5.5)$$

мұндағы j — жорамал бірлік, $j = \sqrt{-1}$. жорамал бірлік оң жағына $\pi/2$ бұрышына, яғни сағат бағытына кері векторды бұру оператордың рөлін атқарады. Минус белгісімен алынған жорамал бірлік $\pi/2$ — ге векторды сағат бағытымен бұрады (5.3, a – суретінде I_0 векторына қарай $\underline{E}_{\sigma_1}$ векторы дәл солай бұрылған).

(5.3) теңдеуін (5.5) өрнегін есепке алумен қайта жазайық:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 - jI_0X_1 = I_0R_1.$$

Осыдан қуат беретін кернеу жиынтығын білдірейік:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_0R_1 + jI_0X_1. \quad (5.6)$$

Қуат беретін кернеу, алынған теңдеуге сәйкес кернеудің төмендеу сомасының түрінде ұсынылған:

- Негізгі магнит ағынымен негізделген, E_1 индукциясының ЭҚК орнын толтыратын $(-\underline{E}_1)$ қосылатын кернеуге тең;
- I_0R_1 — бұл бастапқы ораманың белсенді кедергісінде кернеудің азаюы;
- jI_0X_1 , — бұл сейілтудің индуктивті кедергісінде кернеудің азаюы;

5.3, a - суретте (5.6) теңдеу үш вектордың қосындысы ретінде көрсетілген, сонымен I_0R_1 векторы I_0 векторымен бағытталған, ал jI_0X_1 вектор I_0 векторына қатысты $\pi/2$ рад бұрышына сағат бағытына кері бұрылған (оң жағына қарай).

5.3, a -сурет масштаб сақтамай құрылғаның ескере кетейік. Нақты трансформаторда I_0R_1 және I_0X_1 сандық шамалар мәндері E_1 сандық мәндерінен едәуір аз, сондықтан $(-\underline{E}_1)$ мен $\underline{U}_1$ векторлары сәйкестікке жақын болады. Сондай-ақ, $\Phi_{\sigma 1m}$ сейілтудің магнит ағынының амплитудасы Φ_{0m} негізгі ағынының амплитудасы $\Phi_{\sigma 1m}$ қарағанда әлдеқайда аз болады.

Бос жүріс режиміндегі трансформатордың орнын басу үлгісі. $E_{\sigma 1}$ ЭҚК орнын басатын кернеуге ұқсас X_1 сейілтудің индуктивті кедергісіне I_0 токты өндіру түрінде ұсынуға болады ((5.4)-формуласын қараңыз), сондай-ақ, E_1 ЭҚК орнын толтыратын кернеуді Z_0 толық кедергісіне токты өндіру сияқты ұсынуға болады. Бұл кедергі таза индуктивті болмайды (I_0 векторы мен $(-\underline{E}_1)$ векторы арасындағы бұрыш, δ гистерезис озуының бұрыш шамасына $\pi/2$ рад-қа аз болады).

Сонымен,

$$-\underline{E}_1 = I_0Z_0, \quad (5.7)$$

Мұндағы Z_0 — кешенді шама ((5.5) өрнегімен салыстырыңыз, осындағы X_1 шамасы — нақты, ал $(-jX_1)$ шамасы — таза жорамал сан).

Бос жүріс тогы белсенді және реактивті құрамдас бөліктеріне жіктелген, сондықтан

$$I_0 = I_{0a} + I_{0p}. \quad (5.8)$$

Токты жіктеуге сәйкес Z_0 кедергісі екі параллель тармақ түрінде ұсынылуы мүмкін: R_0 белсенді кедергімен тармақ бойынша I_{0a} ток өтеді, ал X_0 индуктивті кедергісі бар тармақ бойынша I_{0p} ток өтеді. R_0 кедергісі гистерезис пен құйынды токтарға болаттағы (магнитті сымда) шығындарды көрсетеді, ал X_0 кедергісі негізгі магнитті ағынның әрекетін есепке алады.

R_1 және X_1 кедергілері жүйелі қосылғандар ретінде қарастырылады, оған (5.6) теңдеу мен вектор диаграммасы сәйкес келеді. Ондай жағдайда оларды Z_1 толық кедергімен біріктіруге болады, сонда оның кешені

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad (5.9)$$

болады

ал модуль $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$. Айтылғанды ескере отырып (5.6) теңдеуді келесі амалмен қайта жазуға болады:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_0 Z_0 + \underline{I}_0 \underline{Z}_1 = \underline{I}_0 (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1). \quad (5.10)$$

Z_0 кедергісі тармақтардың параллель қосуымен ұсынылғандықтан, ол $\sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ ретінде білдірілмейді (ұқсас өрнек өткізгіштер үшін дұрыс болады). Теориялық электротехникада қолданылатын әдістерді Z_0 , R_0 және X_0 шамаларының байланысын алуға болады, бірақ бұл жерде қажет болмайды.

5.3, б-суретте көрсетілген (5.Y) теңдеуге бос жүрістегі трансформатордың ауыстыру үлгісі сәйкес келеді. Негізгі Φ_0 магнит ағыны $\Phi_{\sigma 1}$ сейілту ағынынан әлдеқайда үлкен болғандықтан, келесі теңсіздіктер орындалады: $R_0 \gg R_1$, $X_0 \gg X_1$, $Z_0 \gg Z_1$. Бұл бос жүріс режимінде трансформатордың параметрлерін практикалық анықтау кезінде ескеріледі; атап айтқанда, Z_0 толық кедергідегі кернеу трансформатордың бастапқы орамасындағы U_1 мәніне тең болып қабылданады.

Бос жүрістегі трансформатордың параметрлерін анықтау. Алдын көрсетілгендей, бос жүріс тәжірибесінің сұлбасына енгізілген вольтметрлердің көрсеткіштеріне сәйкес (5.1-суретті қараңыз) трансформатордың өзгеру коэффициентін табады. Бос жүріс тәжіри-

бесінің нәтижелері бойынша алуға болатын мәндер тізімін жалғастырайық.

Ваттметр көрсеткіші, бос жүрісте трансформатормен тұтынатын P_0 белсенді қуатын береді. Бұл режимде трансформатор жүктемені тұтынбайды, ал оның пайдалы қуаты нөлге тең. Сонымен, ваттметрмен өлшенетін қуат шығындар қуатын ұсынады. Бос жүріс тогы, номиналды жұмыс режимінде трансформатордың орамаларындағы токтардан аз, сондықтан жылулық шығындар (жылулық энергияға электрлік ток энергиясына айналуымен негізделген шығындар) аз болады. Осындай жағдайда, P_0 қуаты іс жүзінде гистерезис пен құйынды токтардағы трансформатордың болаттағы (магнит сымдағы) шығындар қуатына тең болады.

$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$ трансформатордың бос жүрісіндегі белсенді қуаты. U_1 кернеуі мен I_0 тоқты құрылғылардың көрсеткіштерімен анықтайды, содан кейін *бос жүрістегі трансформатор қуатының коэффициентін* ұсынатын $\cos \varphi_0$ табады:

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{U_1 I_0}. \quad (5.11)$$

Енді бос жүрістегі токтың белсенді және реактивті компоненттерін анықтауға болады:

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0; \quad I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (5.12)$$

Трансформатордың бос жүрістегі кедергісі (5.1 бөлімін қараңыз) тәжірибеде келесі формулалар бойынша анықталады:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; \quad R_0 = \frac{U_1}{I_{0a}} = \frac{P_0}{I_{0a}^2}; \quad X_0 = \frac{U_1}{I_{0p}}. \quad (5.13)$$

Егер бос жүріс тәжірибесіндегі сұлбасында (5.1-суретті қараңыз), құрылғылар көрсеткіштерін есептеп, U_1 кернеуін нөлден номиналдық дейін немесе номиналдықтан жоғары мәнге реттесек, онда трансформатордың бос жүрістегі сипаттамаларын алуға болады: бос жүріс тогының тәуелділігі, бастапқы орамадағы кернеуден шығындар қуаты мен қуат коэффициенті.

5.2.

ЖҮКТЕМЕ РЕЖИМІНДЕ ТРАНСФОРМАТОРЛАР ЖҰМЫСЫ

Кернеулер және МҚК тепе-теңдік теңдеулері. Егер трансформатордың екінші орамасының электр қабылдағыш қосылған болса, онда осы орама мен қабылдағыш бойымен I_2 ағыны өтеді. Екінші

орамадағы токтың магнит өрісі негізгі магнит ағынын қалыптастыруына қатысады (бұдан әрі, бұл егжей-тегжейлі қаралады), сонымен $E_{\sigma 2}$ сейілуінің ЭҚК индукциялайтын $\Phi_{\sigma 2}$ сейілту ағынын қалыптастырады және X_2 сейілтудің индуктивті кедергісін негіздейді. Екінші реттегі ораманың да R_2 белсенді кедергісі бар. Екінші орама бойынша ток өткен кезде (5.2) теңдік орнына келесі теңдеу орындалады

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - I_2 R_2 - j I_2 X_2 = \underline{E}_2 - I_2 Z_2, \quad (5.14)$$

мұндағы Z_2 — толық кедергі кешені, $Z_2 = R_2 + j X_2$.

(5.14) теңдеу қуат беру кернеуінің теңдеуіне ұқсас болады (трансформатордың екінші орамасы – электр энергия қабылдағыштың қуат көзі болып табылады): көздердің шығуындағы кернеу, ішкі кернеудегі кернеудің азаю шамасына ЭҚК-дан төмен болады.

Екінші орамада ток өтетін кезде, I_1 бастапқы орамасының тогы бойынша бос жүріс тогынан I_0 артық болады. Бастапқы орамаға берілген кернеу теңдеуін (5.6) теңдеулерге ұқсас жазамыз:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1 = -\underline{E}_1 + I_1 Z_1, \quad (5.15)$$

Осында өрнек есептелінген (5.9).

$I_1 Z_1$ кернеуінің төмендеуі U_1 кернеуіне қарағанда аз, сондықтан $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$ жуық теңдік орындалады (бірақ бұл теңдеу бос жүріс режимде нақты орындалады). Орамада индукцияланған ЭҚК (4.5) теңдеуге сәйкес магниттік ағынға пропорционалды болғандықтан, маңызды қорытындыға келеміз: орамадағы ток өзгерген кезде трансформатордың Φ_0 магнит өткізгішінде магнит ағыны мүлдем өзгермейді, егер қуаттын кернеуі өзгермесе. Атап айтқанда, номиналды режимде магнит ағыны XX-гі сияқты болады. XX режимінде магнит ағыны трансформатордың бастапқы орамасының $I_0 w_1$ магнит қозғаушы күші арқылы жасалады. Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, $I_0 w_1$ шамасы кез-келген жұмыс режиміндегі ағымды анықтайды деп тұжырымдауға болады. Екінші маңызды қорытынды - трансформатор жүктемеде жұмыс істеген кезде де, XX тәжірибесінде анықталған, P_0 болаттан жасалған қуаттың жоғалуы іс жүзінде өзгермейді.

МҚК екінші реттегі орамасы $I_2 w_2$ тең. Ленц ережесіне сәйкес, бұл МҚК оның жасайтын магнит ағынын әлсіретуге, яғни Φ_{0m} шамасын төмендетуге ұмтылады. Алайда Φ_{0m} төмендеуімен, E_1 ЭҚК төмендеуі керек (қараңыз (4.5)). Бірақ, саны жағынан дерлік қуат алатын кернеуге тең бастапқы орамаға индукцияланған ЭҚК, іс жүзінде өзгермейді. Бұл, $I_1 w_1$ бастапқы орамадағы МҚК, $I_2 w_2$ екінші реттегі

МҚК магнитсіздендіру әрекетінің орнын толтыратындай, екінші реттегі орамасының тогымен бірге бастапқы орамадағы ток өзгергенде пайда болады. Магниттік өткізгіште магнит ағыны $I_0 w_1$ магнит қозғаушы күші арқылы анықталғандықтан, жоғарыда айтылғанды, математикалық түрде жазуға болады:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1. \quad (5.16)$$

(5.16) теңдеуі МҚК тепе-теңдігінің теңдеуі деп аталады.

Бұл тепе-теңдік жуық орындалатының ескеру керек, өйткені жоғарыда айтылғандай, магнит ағыны жүктеме тогы өзгерген кезде ғана, жуық түрде тұрақты болып қалады.

Бастапқы орамаға екінші реттегі орамасының шамаларын келтіру.

Белгілерді еңгізейік

$$I'_2 = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}, \quad (5.17)$$

мұндағы k — трансформатордың трансформациялық коэффициенті (анықтылық үшін трансформаторды төмендетуші деп қарастырамыз, ал коэффициентті $k = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{нн}}} = \frac{w_1}{w_2}$, трансформациялық, (4.6) теңдеуін қараңыз).

Шама I'_2 бастапқы орамаға келтірілген (бастапқы орама орамдарының санына), екінші реттік орама тогы деп аталады. Енді, (5.16) теңдеуінің екі бөліктерін w_1 -ге бөлсек, аламыз:

$$I_1 + I'_2 = I_0 \quad (5.18)$$

(5.18) теңдеудің (5.16) теңдеу сияқты жуық сипаттамасы бар. I_1 және I'_2 векторлар сомасының реактивті құрылымы *магниттендіретін ток* деп аталады, өйткені магнит өткізгіштегі магнит ағыны токтың реактивті құрылымымен анықталады. Магниттендіретін ток шамамен I_0 мәнге тең (5.3, a -суретті қараңыз).

Теңдеулерді жеңілдету үшін трансформатордың векторлық сұлбасын құрастыруға ыңғайлы болу үшін және оның болып жатқан үрдістерін талдау үшін, түрлі шамалардағы берілген мәндерді пайдалануға ыңғайлы болады. Екінші реттегі орамаға қатысты шамаларды бастапқы орамаға келтіре отырып, екінші реттегі ораманың орамдар саны бастапқы ораманың орамдар ($w_2 = w_1$) санына тең болады деп болжанады, бірақ *трансформатордың қуаты, қуат жоғалуы және фазалық бұрыштары сақталады.*

Орамдар санының шартынан, E'_2 екінші реттегі ораманың кел-

тірілген ЭҚК, бастапқы орама ЭҚК тең болатыны анық:

$$E'_2 = E_1 = E_2 k = E_2 \frac{w_1}{w_2} \quad (5.19)$$

(бастапқы және екінші реттегі орамалардың әр орамында бірдей ЭҚК индукцияланатынын, ал барлық ораманың ЭҚК оның орамдар санына пропорционалды екенін еске түсірейік, (4.5) теңдеуді қараңыз).

Трансформация коэффициентімен ұқсас байланыс, екінші реттегі келтірілген кернеу үшін жазылады:

$$U'_2 = U_2 k, \quad (5.20)$$

Бірақ екінші реттегі ораманың келтірілген кернеуі, бастапқы орама кернеуіне тең емес (бұл вектор диаграммасын қарастырған кезде талқыланады).

(5.17) өрнегі екінші реттегі ораманың келтірілген тогын береді. Дәл сол келтірілген және шығыс трансформатордың толық қуат тепе-теңдігінің шартынан шығады:

$$U'_2 I'_2 = U_2 I_2; \quad I'_2 = I_2 \frac{U_2}{U'_2}; \quad I'_2 = I_2 \frac{I_2}{k}.$$

Келтірілген және шығыс трансформаторлардың екінші реттегі ораманың белсенді кедергісінде джоуль жылулығына жоғалтуларды теңдестіріп, келтірілген екінші реттегі белсенді кедергісін аламыз:

$$(I'_2)^2 R'_2 = I_2^2 R_2; \quad R'_2 = R_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2.$$

(5.17) формуласын есепке алып, келесіні жазуға болады

$$R'_2 = R_2 k^2 \quad (5.21)$$

Шығыс шамамен, берілген сәйілтудің индуктивті кедергісі дәл сол тәсілмен байланысты болады. Электротехника курсынан белгілі болғандай, іс жүзінде индуктивті кедергі, индуктивтілік сияқты орамдар саны-

ның шаршысына пропорционалды болады, сонда $\frac{X'_2}{w_1^2} = \frac{X_2}{w_2^2}$.

Осыдан

$$X'_2 = X_2 k^2 \quad (5.22)$$

(5.14) теңдеудің негізінде (5.17), (5.19)...(5.22) тәуелділіктерді есепке алып, екінші реттегі ораманың келтірілген кедергісінің өрнегін жазайық:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 R'_2 - j \underline{I}'_2 X'_2; \quad (5.23)$$

Көріп отырғанымыздай, екінші реттегі орама кедергісіндегі кернеудің берілген азаюы, екінші реттегі ораманың ЭҚК және оның қысқыштарындағы кернеу бастапқы кернеудің азаюын трансформация коэффициентіне көбейтумен бастапқы кернеудің азаюынан айырмашылығы.

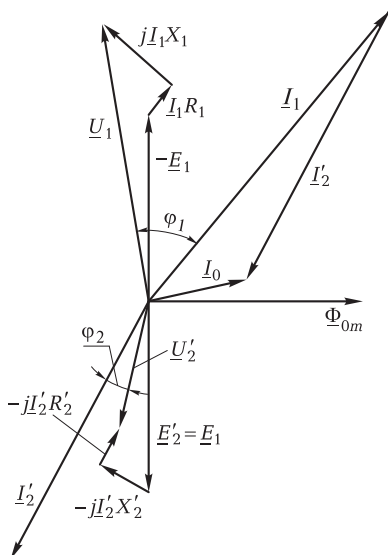
Жүктелген трансформатордың векторлық диаграммасы. Бұл, (5.18), (5.15) және (5.23) теңдеулер негізінде құрылған диаграмма 5.4 – суретте көрсетілген. Мәні 0 және 90° арасында болатын және бастапқы орама тогы, фаза бойынша берілген кернеуден φ_1 бұрышына артта қалған екінші реттегі орама тогы (жүктеме тогы) кернеуден ток фазасы бойынша, екінші орамада φ_2 бұрышына артта қалған жағдайда, белсенді-индуктивті жүктемесі кездейсоқ таңдалды.

Сыйымдылық жүктеме жағдайында екі орамадағы ток күші кернеуден озып келеді және I_0 векторы өзгермеген жағдайында I_1 вектор $\underline{U}_1$ векторының сол жағынан орналасады.

I_2 және I_1 токтарының мәндері жүктеменің өзгеруімен өзгереді, бірақ олардың векторлық шамасы өзгермейді және I_0 тең болады. Номиналды жүктемеде орамадағы токтар бос тұрған токқа қарағанда әлдеқайда көп, сондықтан I_2' және I_1' векторлары қарама-қарсы бағытталған болады.

$\underline{U}_1$ векторының құрылымы бос жүру режимінде жасалғандай орындалады (5.3 а-суретті қараңыз). Әрине, жүктемеде жұмыс істеген кезде, $I_1 R_1$ кернеуінің азаюы бос жүрістегі токпен емес, фазада I_1 токпен сәйкес келеді.

(5.23) теңдеу негізінде $\underline{U}_2'$ векторын құру кезінде векторларды есептеу қарсы векторларды қосу арқылы ауыстырылады. Екінші реттік ораманың кернеуі бастапқының кернеуіне тең емес екені бай-



5.4.-сурет. Жүктеме режимінде трансформатордың вектор диаграммасы

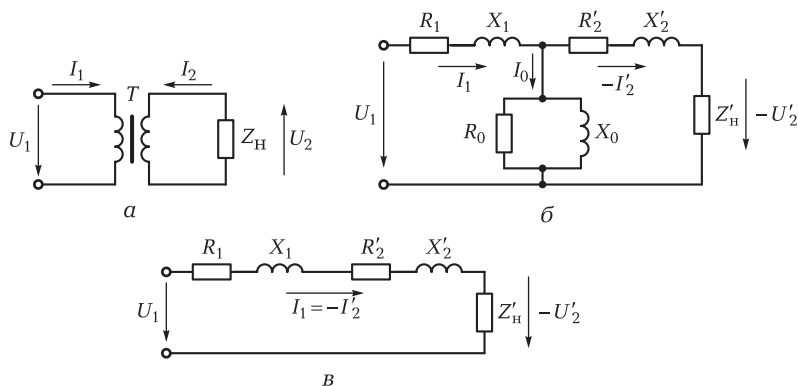
қалады, ал берілген екінші реттік ораманың ЭҚК бастапқы ораманың электр қозғалтқышына тең болады. Әрине, U'_2 және U_1 мәндері бір-бірінен аз ерекшеленеді, өйткені R_1, X_1, R_2 және X_2 -дегі кернеудің азаюы тіпті номиналды токтарда да аз болады (5.4 - суреттегі векторлық диаграмма масштабсыз салынған).

Трансформаторды ауыстыру сұлбасы жүктеме режимінде.

5.5, а - суретте трансформаторды қуат желісіне және Z_H толық кедергісімен кернеуге қосудың негізді сұлбасы көрсетілген, ал 5.5, б - суретте (5.18) теңдеуге негізделген, яғни оның түрленуіне негізделген алмастыру сұлбасы көрсетілген:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2 + \underline{I}_0. \quad (5.24)$$

Бірінші Кирхгоф заңына сәйкес, бұл теңдеу бастапқы орама тогы тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі ток болып қарастырылады, ал минус белгісімен алынған екінші реттік орама тогы және бос жүрістегі ток екі параллель тармақтар тогы болып табылады. Векторлық диаграммада (5.24) теңдеуді, $\underline{I}'_2$ векторды оған қарама-қарсы бағыттағы $(-\underline{I}'_2)$ векторға ауыстыру арқылы көрсетуге болады. 5.5, б - суретте Z_H белгісімен $\underline{U}'_2 = \underline{I}'_2 Z'_H$ кезінде жүктеме кедергісін білдіреді. Қалған ескертулер алдын түсіндірілген еді. Токтар мен кернеулердің шартты оң бағыттары көрсетілген. Трансформатор орамаларының электромагниттік байланысы электрлік байланысты алмастыру сұлбасында ауыстырылады. Трансформатордың *T-пішінді тізбек* деп аталатын жүктеме режиміндегі ауыстыру сұлбасы қосымша парал-



5.5.-сурет. Жүктеме режимінде трансформаторды қосу сұлбалары: а — негізгі; б — толық (Т-пішінді) алмастыру сұлбасы ; в — ауыстырудың қарапайым сұлбасы

лель тармағы бар бос жүріске арналған ауыстыру сұлбасынан ерекшеленеді (5.3, б - сурет).

Орамалар тогымен салыстырғанда бос жүріс тогы төмен болғандықтан, кей жағдайларда жеңіл жүктелетін сұлбаны қолдануға болады (5.5, в - сурет), бос жүріс токтың тармағы болмайды, ал берілген екінші реттегі ораманың тогы өзінің сандық мәні бойынша бастапқы орама тогына тең болады. Бұл токтардың фазалары қарама-қарсы, ал I_1 және $(-I'_2)$ векторлары бірдей деп саналады.

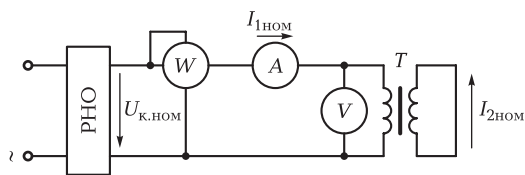
5.3. ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ ТӘЖІРИБЕСІ

Трансформатордың қысқа тұйықталуы. Қысқа тұйықталу (КТ), яғни екінші реттегі орамасының қысқыштарын бір-біріне нөлдік немесе кіші кедергі өткізгіші арқылы қосу, номиналды кедергі бастапқы орамаға берілген жағдайында апатты болып табылады. Сонымен қатар, ток, бастапқы уақытта номиналды мәннен 20-дан 40 есе асуы мүмкін екінші реттегі орамада өтеді. Қысқа тұйықталудан кейін бір немесе бірнеше кернеу кезеңдерінде ауыспалы үдеріс орын алады, одан кейін қысқа тұйықталу тогы номиналды мәннен 10-нан 20-ға дейін асатын тұрақты мәнді қабылдайды. Осындай токтармен сымдардың температурасының айтарлықтай өсуі байқалады, бұл оқшаулауға зақым келтіру мүмкін. Сонымен қатар, қуатты трансформаторларда орамалардың орамдары бұзылып, магниттік өткізгіш деформациялайтын жағдайға жеткізетін үлкен электромагниттік күштер болады. Қуатты трансформаторлар қысқа тұйықталудан жоғары жылдамдықты қорғаныспен қамтамасыз етіледі.

Қысқа тұйықталу тәжірибесі. Ол, трансформатордың жұмысын сипаттайтын, маңызды шамалардың мәндерін алуға мүмкіндік береді, сондай-ақ, қысқа тұйықталу режимі апатты болып саналмайтын кернеудің төмен қуат көзінде жасалады. *Қысқа тұйықталудың номиналды $U_{к.ном}$ кернеуі* деп, ондағы орамалар токтары номиналды мәндерді $I_{1.ном}$ $I_{2.ном}$ қабылдайтын кернеуді атайды.

Қысқа тұйықталу сұлбасы 5.6-суретте берілген. Желінің кернеуі бір фазалық кернеу реттеушісіне беріледі. Бастапқы орама ретінде ВН орамасы (осы ораманың алдындағы номиналды қысқа тұйықталу кернеуі) таңдалып алынады.

Келесі қарастырылу, дәл бастапқы орамада $U_{к.ном}$ тең болған кернеу орнатылғанға сәйкес келеді. Қысқа тұйықталу тәжірибесінде



5.6.-сурет. Қысқа тұйықталу тәжірибесінің сұлбасы.

екінші реттегі орамның тогы өлшенбейді, өйткені нөлдік емес кедергісіне ие амперметр қысқа тұйықталу режимін бұзар еді.

Осыдан алдын, трансформатордың магнит өткізгішіндегі Φ_0 магнит ағыны ораманың тогына байланысты және кернеудің қуат көзіне пропорционалды болғаны анықталды (5.2 бөлімін қараңыз). Қуат трансформаторларының қысқа тұйықталудың номиналды кернеуі, номиналды кернеудің 5%...10% құрайды; сондықтан қысқа тұйықталу тәжірибесінде номиналды ағын, номиналды ағыннан 5%...10% құрайды.

Жүктеме режимінде трансформаторды алмастырудың жеңілдетілген сұлбаны құрастыру кезінде (5.5, в суретті қараңыз), екінші реттегі орамасының тогы, мәні бойынша бастапқы орама тогына жақын екені ескерілген. Қысқа тұйықталу кезінде магнит ағыны, сондай-ақ, магниттеу тогы номиналды жүктемеден әлдеқайда аз екенін ескере отырып, ауыстырудың жеңілдетілген сұлбасы одан да орынды болады.

Белгілерді енгіземіз:

$$R_k = R_1 + R'_2; X_k = X_1 + X'_2; Z_k = Z_1 + Z'_2, \quad (5.25)$$

мұндағы R_k , X_k , Z_k тиісінше, трансформатордың белсенді, индуктивті және кешенді қысқа тұйықталу кедергісі деп аталады, ал басқа белгілердің мағынасы 5.1 және 5.2 бөлімдерде келтірілген.

«Қысқа тұйықталу кедергісі» термині қысқа тұйықталу режимінде қуат көзіне қосылған тізбек тек осы қарсылықпен сипатталатынымен байланысты. Жүктелген трансформатордың векторлық сұлбасын жасау кезінде (5.4-суретті қараңыз) шамамен: $R_1 \approx R'_2 \approx R_k / 2$; $X_1 \approx X'_2 \approx X_k / 2$.

Трансформаторды қысқа тұйықталу тәжірибесінде ауыстыру сұлбасы (5.7, а-сурет) белгілеуді есепке алуымен (5.25) жүктеменің нөлдік кедергісіне байланысты жеңілдетілген ауыстыру сұлбасының негізінде құрастырылған (5.5, в-суретті қараңыз).

Ауыстыру сұлбасына (5.7, а - суретін қараңыз) теңдеу сәйкес келеді:

$$\underline{U}_{\text{к.ном}} = I_{\text{1.ном}} \underline{Z}_{\text{к}} = I_{\text{1.ном}} R_{\text{к}} + j I_{\text{1.ном}} X_{\text{к}} = \underline{U}_{\text{а}} + \underline{U}_{\text{р}} \quad (5.26)$$

мұндағы $\underline{U}_{\text{а}}$ және $\underline{U}_{\text{р}}$ — номиналды қысқа тұйықталу кернеуінің белсенді және реактивті компоненттері (бұл белгілеуде «к.ном» индексі жазбаның қысқа болуына қолданылмаған).

Әлбетте, $U_{\text{к.ном}} = \sqrt{U_{\text{а}}^2 + U_{\text{р}}^2}$. — бұл трансформатордың қысқа тұйықталуға (5.7, б-сурет) арналған векторлық диаграммасы (5.26) теңдеуге сәйкес құрылады.

Бос жүріс тәжірибесіндегідей ҚТ тәжірибесі де нөлге тең: ХХ тәжірибесінде жүктеме тогы нөлге тең (жүктеме жоқ), ал ҚТ тәжірибесінде жүктемеде кернеу нөлге тең болады, өйткені жүтеме кедергісі нөлге тең. Сонымен, қысқа тұйықталу сұлбасына енгізілген ваттметр шығындар қуатын есептейді. Магнит сымда магнитті ағын аз болғандықтан, осы тәжірибеде болаттың шығындары аз болады. Сондықтан, ҚТ тәжірибесінде тұтынатын $P_{\text{к}}$ қуаты, бастысы орамаларда (мыс шығындары) жылулық шығындарды өтеуге жұмсалады.

Егер, орамалар бойымен номиналды токтар өтсе, онда жылулық шығындар қуаты болады:

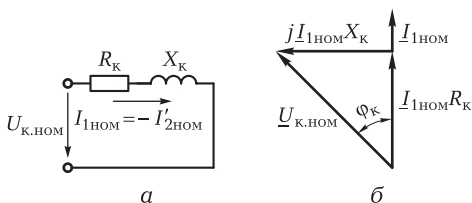
$$P_{\text{к.ном}} = I_{\text{1ном}}^2 R_1 + I_{\text{1ном}}^2 R_2' = I_{\text{1ном}}^2 R_{\text{к}} \quad (5.27)$$

(екінші реттегі орамадағы берілген ток, іс жүзінде бастапқы орама тогына тең екені есептелген).

Токтар өзгергенде жылулық шығындар да өзгереді. Сонымен, мыстың шығындары жүктемеге қатысты ауыспалы шығындар болады.

Қысқа тұйықталу параметрлерін анықтау. Қысқа тұйықталу тәжірибесінен анықтайды:

- $U_{\text{к.ном}}$ қысқа тұйықталудың номиналды кернеуі: кернеу реттеушінің шықпасындағы кернеуді, амперметр көрсеткіші бастапқы ораманың номиналды тогына сәйкес кел-



5.7.-сурет. Трансформатордың қысқа тұйықталу тәжірибесінің графикалық бейнесі:

а — трансформатор ауыстыру сұлбасы; б — вектор диаграммасы

мейінше көтереді (5.6-суретті қараңыз);

- Номиналды токта $P_{\text{к.ном}}$ мыс шығындарының қуаты (ватт-метр көрсеткіші бойынша);
- (5.27) қатынас негізінде мыс шығындарының қуатын біліп $R_{\text{к}}$ қысқа тұйықталудың белсенді кедергісі болады:

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к.ном}}}{I_{\text{ном}}^2}; \quad (5.28)$$

- Ом заңының негізінде $Z_{\text{к}}$ қысқа тұйықталудың толық кедергісі

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к.ном}}}{I_{\text{ном}}}; \quad (5.29)$$

- $X_{\text{к}}$ қысқа тұйықталудың индуктивті кедергісі:

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}. \quad (5.30)$$

Егер ҚТ тәжірибесін суық трансформатормен жүргізсе, онда қысқа тұйықталу параметрлері 75°C жұмыс температурасына әкеледі. Метал кедергісі температураның ұлғаюымен жоғарылайды және 75°C кезінде қысқа тұйықталудың белсенді кедергісі болады:

$$R_{\text{к}75} = R_{\text{к}}(1 + \alpha(75 - \theta)), \quad (5.31)$$

мұндағы α — 1°C -ке температура өзгергенде материалдың электрлік кедергісінің қатысты өзгерісін көрсететін кедергінің температуралық коэффициенті (мыс пен алюминийде $\alpha = 0,0041/^\circ\text{C}$); ҚТ тәжірибесі өткізілетін $^\circ\text{C}$ -нің θ — температурасы.

Ораманың орамдар санына, оның геометрикалық параметрлеріне және сейілудің магнитті ағынның күш сызықтары тұйықталатын қоршаған орта материалдарына қатысты индуктивті сейілудің кедергісі, орама температурасына мүлдем тәуелді емес.

Қысқа тұйықталудың 75°C температурасына келтірілген толық кедергі, табылған $R_{\text{к}75}$ және $X_{\text{к}}$ белгілері бойынша есептеледі:

$$Z_{\text{к}75} = \sqrt{R_{\text{к}75}^2 + X_{\text{к}}^2}. \quad (5.32)$$

Қысқа тұйықталудың номиналды кернеуі мен оның құрамдас бөліктерін, әдетте, бастапқы ораманы қуат берудің номиналды кернеуінен пайызбен көрсетеді. Осы 75°C температураға дейін келтірілген шамалар, формулалар бойынша есептеледі:

$$u_{к75} = \frac{I_{\text{НОМ}} Z_{к75}}{U_{\text{НОМ}}} 100; \quad u_{a75} = \frac{I_{\text{НОМ}} Z_{к75}}{U_{\text{НОМ}}} 100; \quad u_p = \frac{I_{\text{НОМ}} X_k}{U_{\text{НОМ}}} 100. \quad (5.33)$$

Қысқа тұйықталу режиміндегі қуат коэффициентін келесідей жазамыз

$$\cos \varphi_{к75} = \frac{R_{к75}}{Z_{к75}}. \quad (5.34)$$

Төмен қуатты трансформаторлар үшін (бірнеше кВ·А дейін), өткізгіш қимасының ауданы кіші болғандықтан $R_{к75}$ қысқа тұйықталудың белсенді кедергісі $X_{к75}$ индуктивтіден көп болады. Тиісінше, U_a қысқа тұйықталу кернеуінің белсенді құрамдас бөлігі U_p реактивті құрамдас бөлігіне қарағанда үлкен болады. Бұл жағдайда фазалық ығысу бұрышы $\varphi_k < 45^\circ$ және $\cos \varphi_k > 0.707$ құрайды. Жүз және мың киловольт-ампер қуаты бар трансформаторлар үшін қарсы теңсіздіктер орынды болады.

Егер қысқа тұйықталу тәжірибесінің сұлбасында (5.6-суретті қараңыз) бастапқы ораманың кернеуін нөлден қысқа тұйықталудың номиналды кернеуіне дейін немесе құрал көрсеткіштерін есептеумен шамалы жоғары мәнге дейін реттесек, трансформатордың қысқа тұйықталу сипаттамаларын алуға болады - бастапқы орамада кернеуден қысқа тұйықталу тогының, шығындар қуатының және қуат коэффициентінің тәуелділігі.

5.4. ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ МЕН БОС ЖҮРІС ТӘЖІРИБЕЛЕРІНДЕ АНЫҚТАЛАТЫН ПАРАМЕТРЛЕРДІҢ ӘСЕРІ

Жүктемеге жұмыс жасау кезінде трансформатор кернеуінің өзгеруі.

Электротехника курсынан белгілі болғандай, электр энергия (жүктемені) қабылдағышына жұмыс істейтін қуат көзінің қысқыштарында U кернеуі, r қуат көзінің ішкі кедергісінде ΔU кернеуінің төмендеу шамасына бос жүріс режимінде U_x кернеуінен төмен болады:

$U = U_x - \Delta U$, әрі $\Delta U = Ir$, мұндағы I — қабылдағыш пен ішкі кедергі бойымен өтетін ток. U_x кернеуі саны жағынан ЭҚК көзіне тең. Қысқа тұйықталу режимінде кернеу нөлге, ал қысқа тұйықталу тогы $I_k = E/r$ тең болады. Сонымен, көздің ішкі кедергісі, көздің қысқа тұйықталу режимінде токты анықтайтын кедергі болады.

Жүктемеге жұмыс істейтін трансформатордың екінші реттегі орамасының қысқыштарындағы U_2 кернеуін, кез келген қуат көзінің қысқыштарында кедергіге ұқсас білдіруге болады:

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U,$$

мұндағы $U_{2\text{ном}}$ — бос жүріс режиміне сәйкес екінші реттегі ораманың номиналды кернеуі ((5.2) өрнегіне сәйкес, ол E_2 екінші реттегі ораманың ЭҚК-мен сандық мәнге сәйкес келеді; ΔU — жүктеменің жұмысында кернеудің өзгерісі.

Жүктемеге трансформатордың жұмысында кернеудің өзгерісі, әдетте бос жүріс кезінде кернеуден процентпен білдіріледі:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{2\text{ном}}} 100 = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}} 100. \quad (5.35)$$

Екінші реттегі ораманың кернеулерін осы өрнекте бастапқы орамада берілген шамаларға өзгертуге болады, өткені бұл ретте қатынас өзгермейді.

Δu кернеуінің өзгеруі u_{a75} және u_p қысқа тұйықталу кернеуінің номиналды құрамдас бөліктеріне тәуелді ((5.33) өрнегін қараңыз); жүктеме сипаттамасына, яғни жүктеменің тогы мен кернеуі арасындағы φ_2 фазалар ығысуының бұрышынан; I_2 жүктеме тогының мәнінен немесе басқа сөзбен айтқанда, келесі тәсілмен анықталатын β жүктеме коэффициентінен:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}. \quad (5.36)$$

Трансформатордың екінші реттегі ораманың қысқыштарында жүктеме кезінде қолданылатын кернеудің өзгеру өрнегін дәлелсіз көрсетеміз (оны трансформатордың векторлық сұлбасының талдауынан алуға болады):

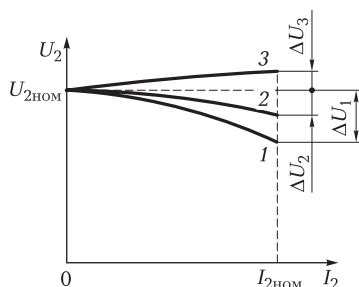
$$\Delta u = \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) \quad (5.37)$$

(номиналды қысқа тұйықталу кернеуінің белсенді құрама бөлігін белгілеу кезінде «75» индексін шығармады).

$\varphi_2 = \varphi_k$ тендігі орындалған кезде, Δu кернеуінің өзгеруі осындай жүктеме сипаттамасында ең үлкен мәнге ие болатынын айта кету керек, бұл жердегі φ_k , R_k және X_k параметрлермен анықталатын қысқа тұйықталу тәжірибесінде ток пен кернеу арасында фазалар ығысуының бұрышы ((5.34) өрнегін қараңыз).

X_k кедергісі индуктивті сипатта болғандықтан, Δu мәні белсенді индуктивті сыртқы жүктемеде барынша көп болады.

Белсенді жүктеме кезінде $\varphi_2 = 0$, $\cos \varphi_2 = 1$; $\sin \varphi_2 = 0$ және $\Delta u = \beta u_a$,



5.8.-сурет. Түрлі жүктемелердегі трансформатордың сыртқы сипаттамалары:

1 — белсенді индуктивті; 2 — белсенді; 3 — белсенді-сыйымдылықты

яғни бұл жағдайда кернеудің өзгеруі қысқа тұйықталу кернеуінің белсенді құрама бөліктері арқылы анықталады.

Белсенді сыйымдылықты жүктеме кезінде, φ_2 және $\sin\varphi_2$ бұрышы теріс болған кезде Δu кернеуіндегі өзгеріс βu_a мәнінен аз. φ_2 бұрышының белгілі бір мәнінде кернеудің өзгеруі нөлге тең болады, яғни осындай белсенді сыйымдылықты жүктемеде екінші реттегі орамадағы кернеу, бос жүріс кезіндегі кернеуге тең. Ақыры, φ_2 бұрышының үлкен мәндері үшін Δu кернеуінің өзгерісі теріс болып табылады, яғни жүктеме тогы ұлғайған кезде трансформатордың қысқыштарында кернеудің ұлғаюын білдіреді.

ҚТ тәжірибесінің нәтижелері бойынша қысқа тұйықталудың номиналды кернеудің белсенді және реактивті құрама бөліктері анықталады. Жүктеменің β коэффициентінің және $\cos\varphi_2$ жүктеменің қуат коэффициентінің мәндерін ескере отырып, (5.37) формуласы бойынша Δu кернеуінің өзгеруін анықтай аламыз. Содан кейін, (5.35) формуланы пайдаланып және тәжірибелі сынақтарды қолданбай берілген жүктемеде U_2 екінші реттегі орамада кернеуді табуға болады.

Жүктеменің әртүрлі сипаттамаларында трансформатордың сыртқы сипаттамалары 5.8-суретте көрсетілген. Генератор сияқты, трансформатордың сыртқы сипаттамасы – бұл $U_2(I_2)$ жүктеме тогынан қысқыштарының шықпасында кернеудің тәуелділігі (осы жағдайда-екінші реттегі орама қысқыштарында). Сыртқы сипаттамалардың 1 белсенді-индуктивті, 2 белсенді және 3 белсенді-сыйымдылықты жүктемелерде өзара орналасуы, жүктеменің осы түрлерінде Δu мәндерінің айырмашылықтары туралы айтылған мәліметке сәй-

кес келеді.

Трансформатордың энергия жоғалтулары. Электр энергиясын тасымалдау жағдайында пайда болған жоғалтулар бос жүріс және қысқа тұйықталудың тәжірибелі түрде сынақтарда анықтауға болатыны бұрын көрсетілген еді (5.1 және 5.3 – бөлімдерін қараңыз).

Бос жүріс тәжірибесінде, магнит сымын мерзіммен қайта магниттеумен байланысты P_0 магнит шығындарының қуаты анықталады. Қайта магниттеу магнит шығындарының екі түрін болдырады: магнит өткізгішінің қалдық магниттелуін еңсеруге энергия шығындарынан туындаған гистерезске байланысты шығындар және магниттік өткізгіште құйынды токтардан шығындары. Магниттік шығындар айнымалы ток жиілігі артқан сайын көбейеді, әрі гистерезистен шығындардың қуаты жиіліктің бірінші дәрежесіне пропорционалды болады, ал құйынды токтардан пайда болған шығындар жиілік шаршысына пропорционалды болып табылады. Тұрақты кернеу мен токтың тұрақты жиілігімен магниттік шығындардың күші жүктеменің тоғына тәуелді емес. Магниттік шығындарды азайту үшін, магниттік өткізгішті жіңішке гистерез ілмекпен (жұмсақ магнитті материал) және кіші қалдық магнитизациямен сипатталатын электртехникалық болаттың оқшауланған жіңішке тақташалардан жасайды.

Қысқа тұйықталу тәжірибесінде, номиналды токтың жүктемесінде $P_{к.ном}$ трансформатор орамаларындағы электр шығындарының қуаты анықталады (5.27-өрнекті қараңыз). Жүктемеде жұмыс істейтін трансформатордың электр қуат шығыны жүктеменің ток шаршысына пропорционалды түрде өзгереді, демек, (5.36) өрнекпен анықталған β жүктеме коэффициентінің шаршысына пропорционалды:

$$P_{к} = \beta^2 P_{к.ном}. \quad (5.38)$$

Трансформатордың пайдалы әрекет коэффициенті. Желіден трансформатормен тұтынатын P_1 белсенді қуатының электр энергия қабылдағышына тасымалданатын P_2 белсенді қуатына қытанысы ретінде анықталады. Трансформатор мен генератордың ПЭК есептеу формулалары бірдей ((2.2)-өрнегін қараңыз), бірақ трансформатордың пайдалы қуаты $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ ретінде көрсетілген, мұнда $S_2 = U_2 I_2$ – екінші реттік тізбектің жалпы қуаты болады. Трансформатордың бастапқы орамасына қолданылатын кернеудің тұрақты мәнімен ($U_1 = U_{1ном}$), екінші реттегі орамадағы кернеу шамалы өзгереді ($U_2 \approx U_{2ном}$), сондықтан екінші реттегі тізбекке берілетін қуаты, I_2 ток жүктемесіне пропорционалды болады, яғни β жүктеме

коэффициентіне:

$$P_2 = \beta S_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 = \beta U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2$$

$\sum P$ трансформатордың жалпы шығындары, бұрын сипатталғанға сәйкес, тұрақты магнитті және айнымалы электрлік шығындардан тұрады:

$$\sum P = P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}$$

Осылайша, трансформатордың ПӘК өрнегі келесідей жазылады:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}}, \quad (5.39)$$

немесе

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}} 100.$$

Жоғарыда көрсетілген формулалардың біреуі (5.39) ПӘК-ті бірліктің үлестерімен, ал екіншісі пайызбен көрсетіледі.

Трансформаторлар шығындары үлкен емес. Сонымен кіші қуатты трансформаторларында (1 кВ·А дейін) номиналды ПӘК 85...95 % құрайды, ал үлкен қуатты трансформаторларында 95...99,5 % құрайды.

Жүктеме болмаған жағдайда ($I_2 = 0$; $\beta = 0$) ПӘК нөлге тең. Жүктеме ұлғайған кезде ПӘК жоғарылайды және кейбір $\beta = \beta_{\text{max}}$ мәндерде максимум арқылы өтеді. β_{max} мәні $\eta = f(\beta)$ функциясының экстремумын табу жолымен анықталу мүмкін. Ол үшін айнымалы β -ге қатысты берілген функцияның туындысын табу керек және оны нөлге жақындату қажет. Осындай операцияның нәтижесінде теңдеу шығады

$$\beta_{\text{max}}^2 P_{\text{к.ном}} = P_0. \quad (5.40)$$

Осылайша, трансформатордың ПӘК осындай жүктемеде максималды болып табылады, сонымен $P_{\text{к}} = \beta_{\text{max}}^2 P_{\text{к.ном}}$ айнымалы электрлік шығындар қуаты P_0 тұрақты магниттік шығындар қуатына тең болады. (5.40) өрнегінен мәнді табамыз

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к.ном}}}}. \quad (5.41)$$

Егер, трансформатор үнемі номиналды жүктемеде жұмыс істейтін болса, онда номиналды токта барынша ПӘК алу тиімді болады (бұл жағдайда $\beta_{\text{max}} = 1$), ал егер толымсыз жүктеме әдеткі болса (екінші реттегі тізбектің тогы номиналдыдан аз болса), онда $\beta_{\text{max}} < 1$ болғаны орынды болады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Трансформатордың бос жүріс режиміндегі тәжірибесі қандай мақсатпен орындалады?
2. Трансформатордың магниттік ағыны мен бос жүріс тогы арасындағы фазалар ығысуы немен түсіндіріледі?
3. Трансформатордың бастапқы және екінші реттегі орамалар теңдеулерін жазыңыз және түсіндіріңіз.
4. Бос жүріс режимінде трансформатордың ауыстыру сұлбасын сызыңыз және түсіндіріңіз.
5. Трансформатордың бос жүріс тәжірибесінде қандай қуат анықталады?
6. Жүктемеге жұмыс істеу кезінде бастапқы орама мен екінші реттегі орама кернеудің теңдеулерін жазыңыз. Олардың бос жүріс режиміне сәйкес теңдеулерінен айырмашылықтарын көрсетіңіз.
7. Трансформатордың магнит ағынның орамасындағы токтар өзгерген кезде шамалаған тұрақтылығын түсіндіріңіз.
8. Трансформатордың ПӘК теңдеуін жазыңыз және түсіндіріңіз.
9. Бастапқы орамасына екінші реттегі ораманың шамалары қандай мақсатпен қолданылады? Токтың, кернеудің, ЭҚК және екінші реттегі ораманың кедергісі мен осы шамалардың бастапқы мәндерінің арасындағы қандай байланыс бар?
10. Жүктеме режимінде трансформаторды ауыстырудың толық және жеңілденген сұлбасын сызыңыз.
11. Трансформатордың қысқа тұйықталу қалай өткізіледі? Қысқа тұйықталудың номиналды кернеуі деген не?
12. Қысқа тұйықталу режимінде ауыстыру сұлбасын жазыңыз және түсіндіріңіз?
13. Қысқа тұйықталу тәжірибесінен қандай кедергілер мен қуат анықталады?
14. Белсенді, индуктивті және сыйымдылықты жүктемелерде ток жүктемесінен екінші реттегі орамада кернеудің өзгерістер тәуелділігінің ерекшеліктерін атаңыз.
15. Трансформатордың пайдалы әрекет коэффициенті тәжірибе деректерінен қалай анықталады?

ҮШ ФАЗАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАРАЛЛЕЛЬ ЖҰМЫСЫ

6.1. ҮШ ФАЗАЛЫ ҚУАТТЫ ТРАНСФОРМАТОР- ЛАРДЫҢ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ

Трансформаторлық топ және үш фазалы трансформатор. Үш фазалы ток тораптарында электр энергиясын трансформациялау үшін, бір фазалы үш трансформатордан құралатын трансформаторлық топтар, сондай-ақ өзіндік үш фазалы трансформаторлар қолданылады.

Трансформаторлық топтар (топтық трансформаторлар) тек жоғары (60 МВ·А асатын) қуат болғанда ғана қолданылады. Топтық трансформатордың бір аппарат түрінде жасалған үш фазалы трансформатордан артықшылығы мынада: топқа кіретін әрбір бір фазалы трансформатордың габариттік өлшемдері мен салмағы топтың жалпы қуатына конструкцияланған үш фазалы бір трансформаторға қарағанда кішірек болады. Осының арқасында топтық трансформаторды тасымалдау - оңай. Бұдан бөлек, егер трансформаторлық топ пайдаланылатын болса, онда резервте бір фазалы бір трансформатор тұрса жеткілікті. Алайда, трансформаторлық топтың құны бірдей қуатқа есептелген үш фазалы трансформатормен салыстырғанда әлдеқайда жоғары, жалпы габариттік өлшемдері үлкен және ПЭК-і аз болады.

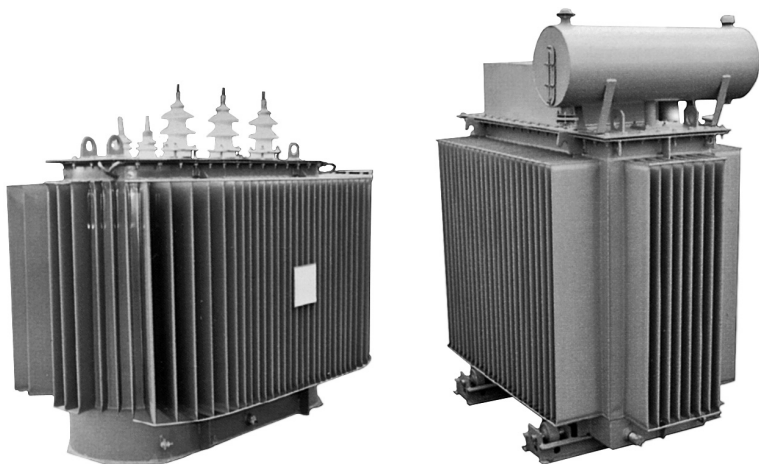
Бір аппарат түрінде жасалған үш фазалы трансформатордың конструкциясы 4.1, *з* -суретте сұлба түрінде көрсетілген. Оның магнитті өткізгішіне үш өзекше салынған, солардың әрқайсысына бір фазаға тиесілі жоғары және төмен кернеудегі орамалар орнатылады. Жеке-леген фазалардың магнитті ағындары тұйықталуы мүмкін қосымша өзекшенің қажеті жоқ, өйткені бұл өзекшенің ағыны нөлге тең болар еді. Шын мәнінде, орама фазаларының ағындары бірін екіншісіне қатысты алғанда, фаза бойынша 120° бұрышқа ығыстырылған және жиынтық ағын нөлге тең:

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0.$$

Бұл ретте орамалары ортаңғы өзекшеге орнатылған B фазасының (5.2-бөлімді қараңыз) магниттелетін тогы басқа екі фазаның магниттелетін тогынан кем болады, себебі осы фазаның магнитті күштік желілерінің ұзындығы шеткі екі фазаға қарағанда аздау. Шынында, A мен C фазаларының күштік желілері тиісті өзекшелердің бойымен және үстіңгі және астыңғы жармалардың жартысынан өтеді, ал B фазасының күштік желілері тек өзекшенің бойымен өтеді. Күштік желілердің аздау ұзындығына ең аз магнитті кедергі сәйкес келеді, демек, аталған магнитті ағынды жасау үшін ең аз магниттейтін ток кажет. Бұрын айтылып кеткендей (5.2-бөлім), магниттейтін ток дерлік бос жүрістің тогына тең келеді, сондықтан B фазасындағы бос жүріс тогы басқа екі фазадағы бос жүріс тогынан кем шығады. ІО үш фазалы трансформатордың бос жүріс тогының мәні ретінде үш фазадағы токтың орташа арифметикалық мәні алынады:

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3}. \quad (6.1)$$

Маймен салқындатылатын трансформатор (майлы трансформатор). Бұл – қуатты трансформатордың негізгі түрі. Оның орамалармен бекітілген магнитті өткізгіші екі функция атқаратын трансформатор (минералды мұнай) майы құйылған бакқа орнатылған. Біріншіден, май ауаға қарағанда диэлектрлі беріктігі неғұрлым жоғары окшаулауыш орта болып табылады.



6.1.-сурет. Қуатты майлы трансформаторлар.

Бұл трансформатордың майын электрдің тесіп өтуінің ауаның тесіп өтуіне қарағанда электр өрісінің анағұрлым жоғары кернеуде болған кезінде туындайтынын білдіреді. Осы жағдайды ескере келе, ток жүргізу және жерге тұйықтау бөліктерінің арасындағы, сондай-ақ орамалар арасындағы оқшауланған арақашықтықты азайту мүмкіндігі пайда болады. Екіншіден, трансформатор майының салқындату қабілеті ауамен салыстырғанда өте жақсы. Аталған қуатты беру үшін бұл орауыш сым мен магнит өткізгіштің қималарын кішірейту есебінен материалдардың шығысын азайтуға мүмкіндік береді (қажетті қималар қызу жағдайларымен анықталады).

Майдың қоршаған ортамен жылу алмасуы бактың қабырғалары арқылы жүреді. Қуаты 30 кВ-А дейінгі трансформаторлардың бактары тегіс болып жасалады. Қуат жоғарылаған кезде салқындату қарқындылығын арттыру үшін, бактың қабырғалары ойлы-қырлы (6.1-сурет) немесе құбырлы етіліп жасалады. Қуатты трансформаторлардың майы үдемелі түрде салқындатылады: бактағы май сорғымен сорылып, сумен немесе ауамен жылу алмастырғыш арқылы айдалып, бакқа қайтып оралады.

Трансформатор іске қосылған кезде орама мен магнитті өткізгіш қызып, майды қыздырады, бұл ретте май ұлғаяды. Осы себептен майдың үстіңгі көлемі бос қалуы қажет. Алайда, егер осы көлемді бактың бүкіл бетіне қалдыратын болсақ, онда майдың ауамен шектесу ауданы үлкен болады, бұл майдың қарқынды түрде тотығуына және соның салдарынан оның қасиеттерінің нашарлауына әкеп соқтырады. Майдың бос бетін айтарлықтай кішірейту үшін бактың үстіне май кеңейткіш орнатылады. Май кеңейткіш трансформатордың багына құбырмен жалғанған болат цилиндр резервуар түрінде келеді (6.1-суреттегі астыңғы бөлікті қараңыз). Май кеңейткіштің көлемі бактың көлемінен шамамен 10%-ды құрайды. Май кеңейткіштің үстінде трансформатордың багына май құйылатын май құю қылтасы болады. Майдың көлемі температураның ықтимал өзгеруі кезінде бакты толық толтыратындай және майдың деңгейі тек май кеңейткіште өзгертіндей болуы тиіс. Кеңейткіштегі майдың деңгейін бақылау үшін әйнекпен жабылған жіңішке тік саңылау – май көрсеткіш қарастырылған.

Трансформатордың жұмыс үдерісінде қызуы тек май көлемінің ұлғаюына ғана әкеп қоймайды. Қандай болмасын шамадан тыс қызу кезінде трансформатордың қандай да бір бөлігінен оқшаулама мен май ыдырай бастайды. Ыдыраудың нәтижесінде газ тәрізді өнімдері пайда болады. Трансформатордың ішіндегі температураның

шамадан тыс көтеріліп кетуінен қорғау (жылудан қорғау) бак пен май кеңейткішті жалғап тұрған құбырға орнатылатын газ релесінің көмегімен жүзеге асырылады. Газ релесінің негізгі бөлшектері ұстағыштарға бекітілген, тік жазықта орын ауысуға қабілетті екі қалтқы және басқару тізбектерінің түйіспелі жүйесі болып табылады. Бірінші қалтқы көлденең ернемектің астындағы газ релесінің үстіне орнатылған. Трансформатор қалыпты жұмыс істеп тұрған кезде реле майға лық толып, қалтқы үстіңгі қалыпта болады. Қалтқының жанындағы ұстағышқа өзіне жылжымалы түйіспенің пластинасын тартатын тұрақты магнит бекітілген; бұл ретте соңғысы ескерту сигналдарын басқару тізбегінің тұйық күйде болуын қамтамасыз етеді (басқару тізбегі жылжымалы және жылжымайтын түйіспелер ажыраған кезде сигналдар қосылатындай етіліп орнатылған. Мұндай сұлбалық шешім реле жұмысының сенімділігін арттырады). Бөлінетін газ көлденең ернемектің астындағы реленің үстіңгі бөлігіне жиналады да, майдың деңгейін төмендетеді. Осының салдарынан бірінші қалтқы магнитпен бірге төмен түсіріледі. Түйіспелер ажырап, ескерту сигналдары іске қосылады. Бұл ретте трансформатор сөніп қалмайды. Егер газ бөліну үдерісі неғұрлым қарқынды сипатта болса, майдың деңгейі тіптен төмендеп кетеді, яғни екінші, астыңғы қалтқының төмен түсуіне және трансформатордың авариялық сөндірілуін қамтамасыз ететін басқару тізбегіндегі түйіспелердің ажырауына әкеп соқтырады.

Мысалы, қысқа тұйықталу барысында туындауы мүмкін газдың тым қарқынды түзілуі кезінде трансформатордың герметик бағындағы қысымның өсетіні соншалықты болғаннан, бак деформацияланып кетеді. Деформацияны болдырмау үшін қуаты 1 000 кВ·А және одан жоғары трансформаторларға түтіндік құбыры орнатылады. Құбырдың астына бактың қақпағына бекітіліп, соған байланысады. Үстінен әйнек пластинамен жабылады. Қарқынды газ түзілімі кезінде пластина бактың зақымдануынан бұрын жаншылады.

Майдың температурасы әртүрлі тұрпаттағы термометрлермен бақыланады. Қуаты 1 000 кВ·А дейінгі трансформаторларда бактың қақпағына металл жиектемемен орнатылатын сынапты термометрлер пайдаланылады. Қуаты 1 000 кВ·А асатын және одан жоғары трансформаторларда бактың қапталына бекітілетін термометрикалық сигнализатор бар. Қуаты 7500 кВ·А басталатын және одан жоғары үш фазалы трансформаторларда және қуаты 3000 кВ·А және одан жоғары бір фазалы трансформаторларда өлшеу нәтижелерін басқару қалқанына беруге арналған қашықтан температура өлшегіш болуы тиіс.

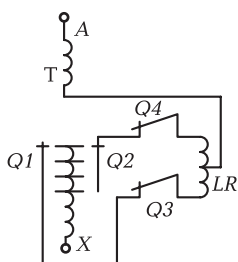
Майдың оқшаулау қасиеттерін төмендететін тотығатын заттардан үздіксіз тазалау үшін, трансформатор, оның бағына құбыр арқылы жалғанған тік цилиндр түрінде келетін термосифонды сүзгімен жабдыкталады. Термосифонды сүзгі сіңіргіш зат — сорбентпен (силикагельмен) толтырылған. Онда майдың жоғарыдан төмен бағыттағы *термодиффузиялық циркуляциясы жүреді* (термодиффузия — бұл температура айырмасының ортасында болумен негізделген диффузия).

А д с о р б е р д е майдың циркуляциясы термосифонды сүзгіге қарағанда, майды төменнен жоғары айдайтын май сорғысының көмегімен мәжбүрлі түрде жүзеге асырылады. Майды тазалау тиімділігі май тасқынының жылдамдығымен және сорбенттің қасиеттерімен анықталады.

Трансформатор орамаларының ұштары бактан сыртқа шығарылады. Бұл үшін ішінде ток жүргізетін мыс өзекшесі бар өткізгіш фарфор оқшаулауыштар пайдаланылады. Оқшаулауыштар бактың қақпағына бекітіледі, сондай-ақ жоғарғы және төмен кернеулі ендірмелер деп аталады. Бөлменің ішіне орнатылатын трансформаторлардың ендірмелерінің сыртқы беті, әдетте, тегіс болып келеді; сыртқа орнатылатын трансформаторлардың ендірмелері — ойлы-қырлы болып келеді (6.1-суретті қараңыз, үстіңгі бөлік).

Трансформациялау коэффициентін реттеу. Трансформациялау коэффициентін реттеу қажеттілігі, біріншіден, трансформаторлар қосылатын электр тарату желілерінің әртүрлі нүктелеріндегі кернеудің әрқалай болуымен қамтамасыз етілген. Екіншіден, желінің кез келген орнындағы кернеу жүктеменің ауытқуы барысында өзгереді. Бұл ретте трансформатордың қосалқы орамасының қысқыштарындағы кернеу номиналды болуы немесе одан болмашы ғана өзгешеленуі тиіс. Трансформациялау коэффициентін реттеу үшін ЖК орамасының орамдар саны өзгертіледі, бұл үшін бактың ішіне ауыстырып қосқыш орналастырылады. Ауыстырып қосқыштың тұтқасы трансформатордың қақпағына немесе бактың қабырғасына шығарылады.

Ауыстырып қосу ораманың реттеуіш тармақтарының арасында жүзеге асырылады. Егер орама фазасынан үш жаққа тармақтау көзделген болса, онда орташа тармақталу трансформациялаудың номиналды коэффициентіне, ал басқа екеуі номиналды коэффициенттен $\pm 5\%$ -ға ерекшеленетін трансформациялау коэффициентіне сәйкес келеді. Трансформациялау коэффициентінің мәндері арасындағы қысқа аралықты қамтамасыз ететін тармақталу саны көбірек қара-



6.2.-сурет. Трансформаторды жүктемемен ауыстырып қосу сұлбасы.

луы да мүмкін.

Трансформатор тораптан ағытылған кезде ауыстырып қосу *қыздырмай ауыстырып қосу* (ҚАҚ) деп аталады.

Трансформаторды ағытпай ауыстырып қосу *жүктемемен реттеу* (ЖР) деп аталады. Соңғысы ешқандай уақыт мезетінде трансформатор тораптан ағытылып қалмайтындай етіліп орындалады (жүктемемен жұмыс істеу кезінде тораптан ағыту электр доғасының туындауына әкелер еді).

Т трансформатордың жоғары кернеудегі орамасының бір фазасы ЖР сұлбасымен 6.2-суретте көрсетілген. Орама фазасының ұштары сәйкесінше *A* және *X* деп белгіленген. Ораманың фазасы екі бөлікке бөлінген. Астыңғы бөліктің орамдарынан трансформациялаудың әртүрлі коэффициенттеріне сәйкес келетін тармақтар жасалған. Сұлбаға мыналар қосылған: *Q1* және *Q2* ауыстырып қосқыштары, түйіспелері ажырайтын *Q3* және *Q4* түйістіргіштері, *LR* реакторы (реактор — бұл индуктивтік кедергісі үлкен және көбіне тоқты шектеу үшін қолданылатын құрылғы).

Трансформатор жұмыс істеп тұрғанда *Q1* және *Q2* ауыстырып қосқыштарының түйіспелері ораманың бір тармағында болады. Бұл ретте ток орама фазасының екі бөлігімен және ауыстырып қосқыштардың түйіспелері мен түйістіргіштер қамтылған екі параллель тармақтың бойымен ағады. Көршілес тармаққа ауыстырып қосу мынадай тәртіпте жүзеге асырылады:

- *Q3* түйістіргіштің түйіспелері ажырайды;
- бұдан былай тоқсызданған тармақта болатын *Q1* ауыстырып қосқышының жылжымалы түйіспесі көршілес (сұлбада - төменде орналасқан) тармаққа ауысады;
- *Q3* түйістіргіштің түйіспелері тұйықталады. Осы қалыпта *Q1* мен *Q2* ауыстырып қосқыштарының арасындағы ораманың бөліктері ауыстырып қосатын құрылғының тұйық тізбегінде қалып қояды. Алайда, осы тізбектегі ток *LR* реакторының кедергісімен шектеліп, үлкен мәнге жетпейді;

- $Q4$ түйістіргіштің түйіспелері ажырайды;
- $Q2$ ауыстырып қосқышының жылжымалы түйіспесі $Q1$ ауыстырып қосқышының түйіспесі тұрған тармаққа ауысады;
- $Q4$ түйістіргіштің түйіспелері тұйықталады.

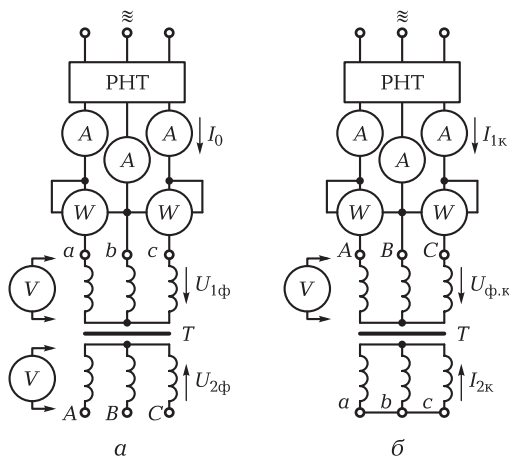
Сипатталған кернеумен реттеу рәсімдемесі автоматты түрде немесе басқару қалқанынан қашықтан жүзеге асырылады.

6.2. ҮШ ФАЗАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫ СЫНАУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ

Үш фазалы трансформатордың бос жүріс және қысқа тұйықталу тәжірибелерінің сұлбалары 6.3-суретте көрсетілген (осы сұлбаларды 5.1 және 5.5, a суретте көрсетілген сұлбалармен салыстырыңыз).

Үш фазалы тораптың кернеуі реттелетін автотрансформатор түрінде келетін үш фазалы кернеу реттегішке (ҮКР) беріледі (7.1-бөлімді қараңыз).

Вольтметрлер, сұлбаларда көрсетілгендей, $U_{1\phi}$, $U_{2\phi}$ фазалық кернеулерін өлшеу үшін трансформатор орамаларының фазаларына жалғанған. Мұндай жағдайда бос жүріс пен қысқа тұйықталу тәжірибелерінің нәтижелері бойынша бір фазалы трансформатордың диа-



6.3.-сурет. Үш фазалы трансформаторды сынау сұлбалары:
 a — бос жүріс тәжірибесі; b — қысқа тұйықталу тәжірибесі.

граммалары мен сұлбаларына сәйкес келетін үш фазалы трансформатордың жекелеген фазаларына арналған векторлық диаграммалар мен орын алмастыру сұлбалары құрылуы мүмкін (5.3, 5.4, 5.5, б және в, 5.7-суреттерді қараңыз). Алайда, техникалық құжаттамада кернеу мен токтың номиналды мәндерін көрсету кезінде желілік кернеу мен желілік токтың қолданыстағы мәндері түспалданады.

Шығындардың қуатын өлшеу үшін екі ваттметрдің сұлбасы пайдаланылады, олардың көрсеткіштерінің жиынтығы, дәлелдей алатындай, үш фазалы тізбектің қуатын береді. Дәл сол сұлба бойынша үш фазалы екі элементті ваттметрдің элементтері жалғанады.

Бос жүріс I_0 тогы формулаға (6.1) сәйкес үш амперметрдің көрсеткіштері бойынша анықталады. Қысқа тұйықталу тәжірибесіндегі ток та осыған ұқсас анықталады.

Трансформатордың трансформациялау коэффициенті бос жүріс тәжірибесінен анықталады. Үш фазалы трансформатор үшін конструктивтік және пайдаланымдық трансформациялау коэффициенттері ерекшеленеді.

ЖК орамасы фазасының тарамдар саны мен ТК орамасы фазасының қатынасы $k_{\text{кон}}$ трансформациялаудың конструктивтік коэффициенті деп аталады:

$$k_{\text{кон}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} \approx \frac{U_{\text{фВН}}}{U_{\text{фНН}}}. \quad (6.2)$$

Өрнек (6.2) бір фазалы трансформаторға арналған (4.6) өрнекпен үйлеседі.

Желілік кернеулердің (желілік сымдардың арасындағы кернеулердің) қатынасы кэкс трансформациялаудың пайдаланымдық коэффициенті деп аталады:

$$k_{\text{экс}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}. \quad (6.3)$$

$k_{\text{экс}}$ мәні ЖК мен ТК орамаларын жалғау тәсіліне байланысты:

- егер ЖК мен ТК бірдей жалғанған, яғни екеуі де 6.3-суреттегідей жұлдызшамен немесе екеуі де үшбұрышпен жалғанған болса, онда $k_{\text{экс}} = k_{\text{кон}}$ (үшбұрыш сұлбасында ораманың бірінші фазасының ұшы екінші фазаның ұшына, екінші фазаның ұшы үшінші фазаның ұшына, үшінші фазаның ұшы бірінші фазаның ұшына жалғанған болса; ораманың фазаларын жалғау нүктелеріне үш сымды үш фазалы желінің сымдары жалғанады) болады;

- егер ЖК орамасы жұлдызшамен, ал ТК орамасы үшбұрышпен жалғанған болса, онда $U_{\text{ВН}} = \sqrt{3}U_{\text{фВН}}$; $U_{\text{НН}} = U_{\text{фНН}}$ болады және $k_{\text{экс}} = \sqrt{3}k_{\text{кон}}$;
- егер ЖК орамасы үшбұрышпен, ал ТК орамасы жұлдызшамен жалғанған болса, онда $k_{\text{экс}} = k_{\text{кон}}/\sqrt{3}$ болады.

Үш фазалы трансформатордың бос жүріс тәжірибесіндегі қуат коэффициенті төмендегі үлгімен тәжірибелік деректер бойынша табылады:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3U_{1\text{ф}}I_0} = \frac{P_0}{3U_{1\text{ф}}I_0}, \quad (6.4)$$

мұндағы P'_0 мен P''_0 — бір фазалы ваттметрлердің көрсеткіштері; P_0 — бір фазалы ваттметрлер көрсеткіштерінің қосындысы немесе екі элементті ваттметрдің көрсеткіші. Қысқа тұйықталу тәжірибесіндегі қуат коэффициенті де осыған ұқсас табылады.

Үш фазалы трансформатордың *номиналды қуаты* номиналды (желілік) токтармен және кернеумен байланысқан:

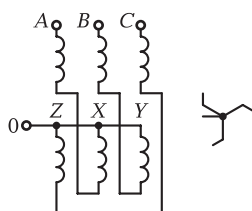
$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}I_{1\text{ном}} \approx \sqrt{3}U_{2\text{ном}}I_{2\text{ном}}, \quad (6.5)$$

яғни, жұлдызша сұлбасы бойынша жалғағандай, үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғауда да оңайға соғады. Бұл электр техникасы курсынан белгілі желілік және фазалық кернеу мен токтар арасындағы қатынастардан туындайды: *жұлдызшамен* жалғағанда $U_1 = \sqrt{3}U_{1\text{ф}}$; $I_1 = I_{1\text{ф}}$; *үшбұрышпен* жалғағанда $U_1 = U_{1\text{ф}}$; $I_1 = \sqrt{3}I_{1\text{ф}}$.

Бір фазалы трансформатор үшін 5.2-бөлімде берілген кернеудің, токтар мен МҚК теңдеулері үш фазалы трансформатордың әрбір фазасына тура келеді. Үш фазалы трансформатордың жекелеген фазасының параметрлері (кедергілер, жүк өзгергенде кернеудің өзгеруі) бір фазалы трансформатордың параметрлері секілді сол бір формулалармен табылады.

6.3. ҮШ ФАЗАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ОРАМАЛАРЫН ЖАЛҒАУ ТОПТАРЫ

Орамаларды жалғау сұлбасы. Трансформаторлардың орамаларын жұлдызша мен үшбұрыш сұлбалары бойынша жалғау туралы 6.2-бөлімде ескерілген. *Жұлдызша* сұлбасы бойынша жалғау Y әрпімен, ал *үшбұрыш* сұлбасы бойынша жалғау Δ әрпімен белгіленеді. Арнайы жағдайларда, соның ішінде күрделі көпірлі түзету сұлбаларында қолданылатын трансформаторларда орамаларды *иректеп*



6.4.-сурет. Ораманы иректеп жалғау сұлбасы және оның шартты белгісі

жалғау қолданылады (6.4-сурет). Ораманың иректеліп жалғанған жекелеген фазасы магнитті өткізгіштің әртүрлі өзекшелерінде тұрған және қарама-қарсы жалғанған екі шарғыдан құралады. Мұндай ораманың жекелеген фазасының ЭҚК векторы осы фазадағы екі шарғының ЭҚК векторларының айырмасы ретінде анықталады. Ораманың векторлық диаграммасын қарау кезінде шарғылардың ЭҚК-нің фаза бойынша ығысқанын анықтауға болады, бір фазасы екінші фазаға 120° бұрышта жақынырақ. Бұл жағдайда иректеліп жалғанған орама фазасының қолданыстағы ЭҚК мәні бір шарғының ЭҚК қарағанда $\sqrt{3}$ есе көбірек болады (егер екі шарғыда тарамдардың саны бірдей болса). Салыстыру үшін: егер трансформатор орамаларының фазалары жұлдызшамен немесе үшбұрышпен жалғанған және егер ораманың бір фазасы екі бірдей шарғының құрамында болса, онда фазаның ЖҚК-і шарғының ЭҚК-не қарағанда 2 есе көп болады.

Орамаларды жалғау топтары. Трансформаторлар параллель жұмыс істеген кезде (6.4-бөлімді қараңыз) тек жекелеген трансформаторлардың орамаларын жалғау сұлбалары ғана емес, сонымен қатар *жалғау топтары* да маңызды. Орамаларды жалғау топтары ұғымына мыналар кіреді:

1) ораманы жұлдызшамен немесе иректеп жалғанған кезде жалпы нүктеден шығуын көрсете отырып, ЖК мен ТК орамаларды жалғау сұлбалары;

2) ЖК (E_{AB}) орамасының желілік ЭҚК-і мен төмен кернеудегі (E_{ab}) тиісті желілік ЭҚК арасындағы фазалардың ығысу бұрышы. Векторлық диаграммада бұл бұрыш E_{AB} векторынан E_{ab} векторына *сағат тілімен* өлшенеді.

Әртүрлі жалғау топтарына сай келетін желілік ЭҚК фазаларының ығысу бұрыштарының арасындағы минималды айырмашылық 30° құрайды. Дәл осы бұрыш жалғау тобын анықтауда бұрышты өлшеу бірлігі ретінде алынады (30° — бұл сағат тілі бір сағатта айналатын бұрыш). Осылайша, егер E_{AB} және E_{ab} ЭҚК арасындағы фазалардың ығысу бұрышы равен 30° , онда трансформатор 1-ші жалғау тобына жатады, егер осы бұрыш 60° тең болса, 2-ші жалғау тобына жатады

және т.б.

Трансформаторлардың орамаларын жалғау топтары:

- ЖК мен ТК орамаларын жалғау сұлбаларына;
- орамалардың қысқыштарының белгілері (таңбасына);
- орау бағытына байланысты.

Орамаларды жұлдызша–жұлдызша сұлбасы бойынша жалғау кезінде кез келген жұп топ алынуы мүмкін: 0, 2, 4, 6, 8, 10, ал жұлдызша–үшбұрыш немесе үшбұрыш–жұлдызша сұлбасы бойынша жалғау кезінде кез келген тақ топ алынуы мүмкін: 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Әртүрлі топтарға сай келетін трансформаторлардың орамаларын жалғаудың кейбір сұлбалары, сондай-ақ желілік ЭҚК векторларының арасындағы бұрыштар көрініп тұрған векторлық диаграммалар 6.5-суретте көрсетілген.

Сұлбаларда (6.5-суретті қараңыз) ЭҚК-нің шартты оң бағыттары көрсетілген. Әрбір сұлбаға ЖК мен ТК орамаларының ЭҚК векторлық диаграммалары келтірілген. Мұнда топографиялық кернеу диаграммаларындағыдай әртүрлі векторлардың екі ұштарының сәйкес келуі сұлбаның тиісті нүктелеріндегі потенциалдардың теңдігін білдіреді. Жекелей алғанда, 1-ші және 2-ші сұлбаларда орамалардың астыңғы қысқыштары бір-біріне жалғанғандықтан және сол себепті потенциалы бірдей болғандықтан, ЭҚК векторлары басталатын диаграммаларда бірдей нүктеде болады. Осы диаграммаларда және сұлбаларда трансформатордың қысқыштарының белгілерін көрсетуге болады. ЭҚК векторының аяқталу ұшы топографиялық диаграммадағы кернеу векторының аяқталу ұшы секілді барлық жағдайларда вектор белгісіндегі бірінші әріпті көрсетеді (мысалы, $\underline{E}_{AB}$ векторының аяқталу ұшы А нүктесі болып табылады). Дәл осы жағдайда геометрияда белгілі қағидалар бойынша, векторлармен орындалған әрекеттер дұрыс нәтижелерге әкеледі.

Әрбір сұлбаға қатысты үшінші диаграммада ЖК мен ТК орамаларының желілік ЭҚК векторларының басталатын ұштары сыйыстырылған, бұл олардың арасындағы жалғау тобының саны аяқталатын бұрышты өлшеуге мүмкіндік береді.

1-ші сұлбадағы ЖК мен ТК орамаларының қысқыштарын жалғау және таңбалау тәсілдері ұқсас, сондықтан $\underline{E}_{AB}$ мен $\underline{E}_{ab}$ ЭҚК арасындағы фазалардың ығысуы нөлге тең, яғни 0 жалғау тобына сай келеді.

2-ші сұлбадағы ТК орамасында қысқыштардың таңбалары шатасқан. $\underline{E}_a$ ЭҚК нәтижесінде $\underline{E}_b$ ЭҚК фазасына үйлесетін болып шықты, ал $\underline{E}_b$ ЭҚК фазасы $\underline{E}_c$ ЭҚК фазасымен үйлеседі. Желілік ЭҚК $\underline{E}_{ab}$ бұл ретте фаза бойынша $\underline{E}_{AB}$ ЭҚК фазасынан 120° бұрышқа қалып отырады, яғни $120^\circ/30^\circ = 4$ жалғау тобына сай келеді.

сұлба №	орамаларды қосу сұлбасы	ЭҚК векторлар диаграммасы	топ
1			$\Upsilon/\Upsilon - 0$
2			$\Upsilon/\Upsilon - 4$
3			$\Upsilon/\Delta - 1$
4			$\Upsilon/\Delta - 11$

6.5.-сурет. Үш фазалы трансформаторлардың орамаларын жалғаудың кейбір сұлбалары мен топтары.

3-ші сұлбада ТК орамасындағы a фазасының үстінгі қысымы c фазаның астыңғы қысымына жалғанған, сондықтан бұл қысықтардың потенциалдары бірдей. Бұл ТК орамасының диаграммасынан көрініс табады: $\underline{E}_a$ векторының аяқталу ұшы мен $\underline{E}_c$ векторының басталу ұшы бір нүктеде жатыр.

Бұл ретте ТК орамалардағы ЭҚК векторларының бағыттары 1-ші сұлбадағыдай, өйткені ЭҚК арасындағы фазалардың айырмасы да

дәл сондай. Желілік $\underline{E}_{ab}$ ЭҚК векторында басқа топографиялық диаграммалардағыдай b нүктесіндегі басы мен a нүктесіндегі ұшы болады. 3-сұлбаға арналған диаграммада $\underline{E}_{ab}$ векторы $\underline{E}_a$ векторымен үйлеседі. $\underline{E}_{ab}$ және $\underline{E}_{AB}$ векторларының арасындағы бұрыш 30° тең, яғни 1-ші жалғау тобына сәйкес келеді.

4-ші сұлбада ТК орамасындағы a фазасының үстіңгі қысқышы b фазасының астыңғы қысқышына жалғанған, сол себепті диаграммада $\underline{E}_a$ векторының аяқталу ұшы векторлардың бұрын бағыттарын сақтай отырып, $\underline{E}_b$ векторының басталу ұшымен сыйыстырылған. $\underline{E}_{ab}$ векторы модуль бойынша тең болып келеді, бірақ $\underline{E}_b$ векторына бағыты бойынша қарама-қарсы. ЖК мен ТК орамаларындағы желілік ЭҚК векторларының арасындағы бұрышты шығарудың қабылданған бағытын ескере отырып, осы бұрыштың 330° тең екенін, ал жалғау тобының 11 екенін табамыз.

Үш фазалы трансформаторлардың орамаларын келесі жалғау топтары стандартты болып табылады: $Y/Y_0 — 0$; $Y/\Delta — 11$; $Y_0/A — 11$; $\Delta/Y_0 — 11$, мұндағы Y_0 символы жалпы нүктесі шығарылған жұлдызшаның сұлбасын (жұлдызша нөлмен) білдіреді. Көбіне ЖК орамасы жұлдызшаға жалғанады, өйткені осы жағдайда берілген желілік фазалық ЭҚК үшбұрышпен жалғауға қарағанда аздау болады. Сәйкесінше ораманың фазалар орамдарының саны да аз болады және осы кезде оқшаулау берік етіліп жасалады. ТК орамасы бәрінен бұрын үшбұрышқа жалғанады, өйткені бұл сұлба ораманың симметриясыздығына аса сезімтал емес. Жұлдызша – ирек – 11 тобын да стандартты топқа жатқызады (бұл ретте ТК орамасының жалпы нүктесі сыртқа шығарылады).

Бір фазалы трансформатор үшін орамаларды жалғаудың тек екі тобы ғана мүмкін болады: $I/I — 0$ және $I/I — 6$. Бірінші жағдайда ЭҚК мен ЖК және ТК орамаларының арасындағы фазалардың ығысуы нөлге тең, ал екінші жағдайда — 180° тең.

Трансформаторлардың орамаларын жалғау тобын анықтау мына тәсілдермен жүзеге асырылады:

- фазометр әдісі — фазалардың айырмасын тікелей фазометрмен өлшеу, ең дұрысы 360° шкаламен өлшеу (салыстырмалы түрде азғантай қуат пен кернеуде қолданылады);
- графикалық әдіс — трансформатордың белгілі бір қысқыштарының арасындағы кернеудің өлшенген мәндері бойынша топографиялық диаграмма құру негізінде;
- есептік әдіс — кернеулердің өлшенген мәндері секілді.

Фазометр әдісі мен графикалық әдісте өлшеу бөлігі бірдей болғандықтан, оларды жалпы атаумен *вольтметр әдісіне* біріктіруге болады.

Орамаларды жалғау тобын анықтаудың графикалық әдісі.

Келесі кезеңдерден тұрады:

- осы қысқыштардың потенциалдарының теңдігін қамтамасыз ету мақсатында ЖК орамасының A қысқышы ТК ораманың a қысқышына жалғанады;
- ЖК орамасына мәні төмендетілген үш фазалы кернеу келтіріледі;
- вольтметрмен сан жағынан тиісті ЭҚК-ге жуық келетін $U_{AB}, U_{bB}, U_{bC}, U_{cB}, U_{cC}$ кернеулері өлшенеді;
- өлшенген мәндер бойынша ЭҚК векторларының диаграммасы құрылады;
- диаграммада жалғау тобын анықтайтын бұрыш өлшенеді.

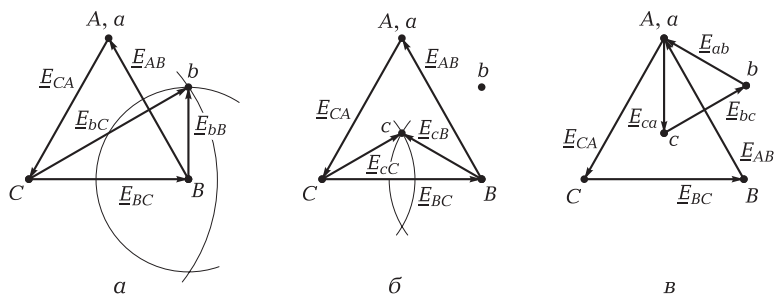
ЭҚК диаграммасын құру тәсілін қарастырамыз (6.6-сурет).

1. Масштабты таңдай отырып, трансформатордың жоғары кернеуіндегі ораманың желілік ЭҚК диаграммасы құрылады. Бұл диаграмма $\underline{E}_{AB}, \underline{E}_{BC}, \underline{E}_{CA}$ векторларынан түзілген ABC үшбұрышы түрінде келеді. Үш бұрыш үш фазалы ЭҚК жүйесінің симметриясына қарай тең қабырғалы болып табылады: $E_{AB} = E_{BC} = E_{CA}$.

2. Төмен кернеудегі ораманың желілік ЭҚК диаграммасының a нүктесін белгілейді (трансформатордың A мен a шықпалары жалғанғандықтан, диаграмманың тиісті нүктелері үйлеседі.)

3. E_{bB} (таңдалған масштабта) радиусының шеңберін ортамен ABC үшбұрышының C төбесіне жүргізеді. Ізделіп отырған, E_{bB} векторының аяқталатын ұшы болып табылатын b нүктесі құрылған шеңберде жатады. Дәл осында келесі тармақты орындау кезінде анықталады.

4. E_{bC} радиусының шеңберін ортамен C төбесіне жүргізеді. Құрылған екі шеңбер екі нүктеде қиылысады. Осы шеңберлердің a нүктесіне жақын қиылысу нүктесі диаграмманың b нүктесі болып та-



6.6.-сурет. Трансформатордың ЭҚК диаграммасын құру:

a — b нүктесінің орналасу орны; $\bar{b}$ — c нүктесінің орналасу орны; $\bar{c}$ — құрылған диаграмма

былады (6.6, *a* сурет).

5. E_{CB} радиусының шеңберін ортамен B төбесіне жүргізеді.

6. E_{CS} радиусының шеңберін ортамен C төбесіне жүргізеді. Топографиялық диаграммадан алынған нүкте a нүктесіне жақын тұрған екі соңғы шеңбердің қиылысу нүктесі болып табылады (6.6, *b* сурет).

7. Төмен кернеудегі ораманың желілік кернеуінің үшбұрышын ала отырып, a , b , c нүктелері жалғанады (6.6, *в* сурет).

8. Жалғау тобы анықталатын E_{AB} мен E_{ab} векторларының арасындағы бұрыш өлшенеді.

Орамалардың жалғану топтарын анықтаудың есепті әдісі. Графикалық әдістегідей, алдымен A мен a қысқыштарын бір-біріне жалғайды; содан кейін бұрын берілген кернеу өлшенеді және олардан бөлек ТК орамасының желілік кернеуі $\underline{U}_{HH} = \underline{U}_{ab}$, содан кейін трансформациялаудың пайдаланымдық коэффициенті формула (6.3) бойынша табылады. Әрі қарай, болжанып отырған жалғау тобына арналған белгілі формулаларды пайдалана отырып, бұған дейін өлшенген кернеудің есепті мәндері анықталады. Есептелген мәндер өлшенген мәндермен үйлескен кезде қолданыстағы жалғау тобының болжанып отырған жалғау тобына сәйкес келетіні туралы тұжырым жасалады.

Ескерілген формулаларда U_{ab} кернеуі мен трансформациялаудың пайдаланымдық коэффициенті қамтылады және векторлық диаграммалардың негізінде геометриялық кескіндерден алынуы мүмкін. Мысалы, стандартты топ үшін Y/Δ — 11 мынаны алуға болады:

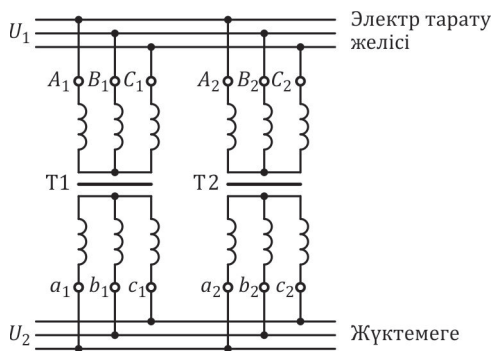
$$U_{BB} = U_{ab} \sqrt{1 - k\sqrt{3} + k^2}; \quad U_{BC} = U_{ab} \sqrt{1 + k^2}; \quad U_{CB} = U_{ab} \sqrt{1 - k\sqrt{3} + k^2},$$

мұндағы k — трансформациялаудың пайдаланымдық коэффициенті.

Y/Δ тобы үшін — U_{BB} 1 формула осылай алынады, ал U_{BC} мен U_{CB} формуласы арасында өзгеріп тұрады.

6.4. ҮШ ФАЗАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ПАРАЛЛЕЛЬДІ ЖҰМЫСЫ

Трансформаторларды параллель жұмысқа қосу талаптары. Екі немесе бірнеше трансформаторлардың жұмысын олардың бастапқы орамалары бастапқы торапқа (электр тарату желісіне), ал қосалқы орамалары жүктеменің жалпы қосалқы торабына жалғанған кезде параллель деп атайды (6.7-сурет). Параллель жалғанған бірнеше трансформаторларды пайдалану кезінде тұтынушыларды электрмен қамту проблемасы бір трансформаторды қолдану жағдайына қарағанда жақсырақ шешіледі, өйткені трансформаторлардың біреуі



6.7.-сурет. Параллель жұмысқа қосылған трансформаторлар.

істен шыққан немесе трансформаторлардың біреуі профилактикалық жөндеуде болған кезде қалғандары жүктемені өзіне қабылдай алады.

Бұдан бөлек, трансформаторлардың параллель жұмысы жүктеменің тәуліктік және маусымдық ауытқуы барысында мақсатқа сай келеді: жүктеме азайған кезде шығындардың орнын толтыруға кететін энергияның шығысын кеміте отырып, трансформаторлардың бір бөлігі сөндіріледі.

Трансформаторлар параллель қосылған кезде олардың қалыпты жұмыс істеуі үшін келесі шарттарды орындау қажет.

1 - ш і ш а р т : трансформаторлардың номиналды бастапқы және қосалқы кернеулерінің теңдігі: $U_{1номT1} = U_{1номT2}$; $U_{2номT1} = U_{2номT2}$.

2 - ш і ш а р т : трансформаторлардың орамаларды бірдей жалғау топтарына тиесілігі.

3 - ш і ш а р т : қысқа тұйықталудың номиналды кернеулерінің, сондай-ақ осыны құрайтын кернеудің теңдігі (5.3-бөлімді қараңыз):

$$u_{кT1} = u_{кT2}; u_{aT1} = u_{aT2}; u_{pT1} = u_{pT2}.$$

1-шарттың бұзылу салдары. 1-шарт параллель жұмысқа қосылған трансформаторлардың трансформациялау коэффициенттерінің теңдігі талабына ептеледі. Бастапқы орамалардың ЭҚК-і бірдей, өйткені олардың әрқайсысы U_1 бастапқы тораптың кернеуімен анықталады. Егер трансформациялау коэффициенттері ($k_{T1} \neq k_{T2}$) әртүрлі болса, онда қосалқы орамалардың ЭҚК-і әрқалай болады: $E_{2T1} \neq E_{2T2}$. Параллель қосылған трансформаторлардың қосалқы орамалары (бастапқы орамалар секілді) кедергілері аз тұйық тізбек түзеді, бұл кедергілер трансформаторлардың қысқа тұйықталу ке-

дергілерін білдіреді. Егер мұндай тізбекте теңгерілмеген ЭҚК жүйесі жұмыс істейтін болса, онда бұл жүйеде $I_{ур}$ теңгерілген ток ағады (салыстыру үшін тұрақты ток генераторларының параллель жұмысы туралы 2.6-бөлімді қараңыз). Қысқа тұйықталу кедергілерінің аздығына байланысты теңгерілген ток тіпті Трансформациялау коэффициенттерінің айырмасы азғантай болғанның өзінде номиналды токпен салыстыруға келеді. Мұндай жағдайларда трансформаторлардың толық қуатын пайдалануға болмайды: толық жүктеме кезінде олар асқын жүктеледі және ұзақ жұмыс атқарғанда істен шығады. Практикада трансформациялау коэффициенттерінің 1 % аспайтын айырмашылығына рұқсат етіледі.

2-шарттың бұзылу салдары. Бастапқы орамалар ток көзінің жалпы торабына (электр тарату желісіне) қосылғандықтан, олардың желілік ЭҚК векторлары параллель қосылған трансформаторлардың жалғану тобына қарамастан, жұп-жұптан тең болады. қосалқы орамаларға қатысты алсақ, әртүрлі жалғану топтарында ЭҚК-нің векторлық айырмасы (немесе кешенді ЭҚК айырмасы) нөлге тең болмайды және орамаларда, мейлі параллель қосылған трансформаторлардың біреуінде $Y/Y — 0$ жалғану тобы, ал екіншісінде $Y/Y — 4$ тобы болса да, номиналды токтан едәуір асатын теңгерілген ток ағады. Осы кезде осындай трансформаторлардың қосалқы орамаларындағы желілік ЭҚК арасындағы фазалардың айырмасы 120° құрайды (6.5-суретті қараңыз) және теңгерілген токты анықтайтын желілік ЭҚК векторлары айырмасының модулі жекелеген трансформатордың желілік ЭҚК-нен $\sqrt{3}$ есе асып кетеді. Бұл ретте теңгерілген токтың жоғары болатыны соншалық, трансформаторлар істен шығады.

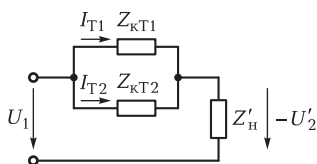
3-шарттың бұзылу салдары. Қысқа тұйықталудың номиналды кернеулері тең болмаған кезде параллель жұмыс істейтін трансформаторлардың арасындағы жүктеме тепе-тең бөлінбейді. Осыны көрсетеміз.

5.5-суретте көрсетілгендей, трансформаторды (нақтырақ, оның бір фазасын) алмастырудың жеңілдетілген сұлбасына сәйкес қосалқы ораманың кернеуі

$$U_1 = -U'_2 + I_1 Z_k \quad (6.6)$$

болады, мұндағы Z_k — трансформатордың қысқа тұйықталуының кешенді кернеуі (5.9) және (5.25) формулаларды қараңыз).

Параллель жұмысқа қосылған екі трансформаторды алмастырудың жеңілдетілген сұлбасына сәйкес (6.8-сурет) олардың бастапқы, сондай-ақ қосалқы кернеулері бірдей болады: $U_{1T1} = U_{1T2} = U_1$;



6.8.-сурет. Параллель жұмысқа қосылған екі трансформаторды алмастырудың жеңілдетілген сұлбасы.

$U_{2T1} = U_{2T2} = U_2$. Бұл жағдайда екі трансформатордың кедергілеріндегі кернеудің азаю теңдеулері де (6.6) бірдей болуы тиіс: $I_{1T1} Z_{кТ1} = I_{1T2} Z_{кТ2}$, мұндағы I_{1T1} мен I_{1T2} — T_1 мен T_2 трансформаторларының бастапқы орамаларының токтары; Z_k — трансформатордың қысқа тұйықталуының толық кедергісі (кешенді кедергі модулі). Осы жерден трансформаторлардың токтары мен олардың ҚТ кедергілері арасында байланыс жүреді:

$$\frac{I_{1T1}}{I_{1T2}} = \frac{Z_{кТ2}}{Z_{кТ1}}. \quad (6.7)$$

Әрі қарай есептемелер үшін қысқа тұйықталудың біршама номиналды кернеуінің $u_k = \frac{I_{н\text{ном}} Z_k}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100$ өрнегі қажет ((5.33) формуланы қараңыз). Осы өрнектен мынаны аламыз:

$$Z_k = \frac{u_k U_{1\text{ном}}}{I_{1\text{ном}} \cdot 100}. \quad (6.8)$$

(6.7) мен (6.8) өрнектерден

$$\frac{I_{1T1}}{I_{1T2}} = \frac{u_{кТ2} U_{1\text{ном}T2}}{I_{1\text{ном}T2} \cdot 100} \frac{I_{1\text{ном}T1} \cdot 100}{u_{кТ1} U_{1\text{ном}T1}}. \quad \text{шығады.}$$

Параллель жалғанған екі трансформатордың бастапқы орамаларына бірдей кернеудің келтірілгенін ескеру керек (оның үстіне бұл кернеудің осы трансформаторлар үшін номиналды болуы-болмауы маңызды емес). Бұдан бөлек, трансформаторлардың номиналды токтарын бірдей деп есептейміз, бұл көп жағдайда орындалады. Аталғанды назарға ала отырып, қысқартулар жасап, мынаны аламыз:

$$\frac{I_{1T1}}{I_{1T2}} = \frac{u_{кТ2}}{u_{кТ1}}. \quad (6.9)$$

Сонымен, параллель жұмыс істейтін трансформаторлардың жүктеу токтары олардың қысқа тұйықталатын кернеуіне кері пропорционалды болады. Жүктеу қуаты токтарға пропорционалды, ал бастапқы орамалардың кернеуі бірдей ($S_{T1} = U_1 I_{1T1}$; $S_{T2} = U_1 I_{1T2}$) болғандықтан, аталған тәуелділік жүктеу қуаты үшін де орын алады.

(6.9) өрнектен, егер u_k төмен трансформатор номиналды токпен

(номиналды қуатпен) жүктелген болса, онда ик жоғары трансформатор толық жүктелмейді. Егер u_k жоғары трансформатор номиналды токпен жүктелетін болса, онда осы параметрдің аз мәніндегі трансформатор асып жүктелген болып шығады және ұзақ уақыт жұмыс атқара алмайды.

Практикада, белгіленген қуатты толық пайдаланбау аз болуы үшін, қысқа тұйықталатын кернеуі бір-бірінен $\pm 10\%$ ерекшеленетін трансформаторлар параллель жұмысқа қосылады.

Трансформаторлардың белгіленген қуатын толық пайдаланбау, қысқа тұйықталатын номиналды кернеу тең болмаған уақытта осы параметрдің белсенді құрамдас бөліктерінің теңдігі, сәйкесінше реактивті құрамдас бөліктерінің теңдігі сақталмайтын жағдайда да орын алады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Трансформаторлық топтар, жеке аппарат түрінде жасалған үш фазалы трансформатордың орнына қандай жағдайларда қолданылады?
2. Үш фазалы трансформатордың магнитті өткізгішінде жекелеген фазалардың магнитті ағындары тұйықталуы мүмкін өзекше неліктен қажет етілмейді?
3. Трансформатор майы қандай функцияларды атқарады? Майлы трансформатордағы май кеңейткіш, газ релесі, түтіндік құбыр және термосифонды сүзгі қандай қызмет атқарады?
4. Трансформатордың трансформациялау коэффициентін реттейтін қандай тәсілдер қолданылады? Жүктемемен реттеудің басты шарты қандай?
5. Үш фазалы трансформаторлардың орамаларын жалғаудың қандай тәсілдері бар? Трансформациялаудың конструктивтік және пайдаланымдық коэффициенті деп нені атаймыз?
6. «Трансформатордың орамаларын жалғау тобы» ұғымына не кіреді? Жалғау тобы неге байланысты?
7. Трансформатордың орамаларын жалғау тобын анықтаудың қандай әдістерін білесіз? Графикалық әдісті сипаттаңыз.
8. Трансформаторларды параллель жұмысқа қосу шарттарын атаңыз. Осы шарттарды бұзу салдары қандай?

ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ АРНАЙЫ ТҮРЛЕРІ

7.1. АВТОТРАНСФОРМАТОРЛАР

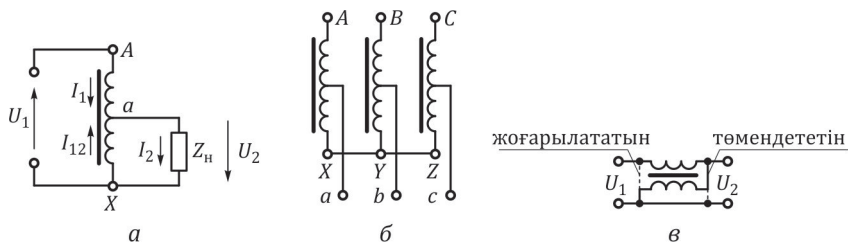
Бір фазалы автотрансформатордың бір фазалы трансформатордан айырмашылығы – бір бөлігі бір мезгілде бастапқы және екінші тізбекке тиесілі, оның тек қана бір орамасы бар (7.1, *a* сурет). Автотрансформаторларға да қатысты пайдалануға болатын, трансформаторларды сипаттайтын негізгі қатынастар - (4.5)...(4.7), (5.16) теңдіктері. Бұл теңдіктерде w_1 — автотрансформатордың *A* және *X* нүктелері арасындағы орамдар саны; w_2 — *a* және *X* нүктелері арасындағы орамдар саны деп болжанады.

Бірінші жақындатуды, бос жүріс тогын ескерместен, соңғы айтылған теңдіктен келесіні аламыз: $I_1 w_1 + I_2 w_2 \approx 0$, яғни, фаза бойынша I_1 және I_2 токтары бір біріне қатысты шамамен 180° жылжытылған. Бұл жағдайда, а түйіні үшін 7.1- суретінде, ал Кирхгофтың бірінші заңы бойынша теңдікті арифметикалық нұсқада жазуға болады:

$$I_2 - I_1 = I_{12}, \quad (7.1)$$

мұндағы I_{12} — бастапқы және екінші тізбе үшін болатын, ораманың бөлігі бойынша жүретін ток.

U_2 кернеуі U_1 кернеуінен төмен болғандықтан (төмендетуші трансформатор), (4.7) теңдігіне сәйкес, I_2 тогы I_1 тогынан үлкен болады. 7.1 суретте (мысал ретінде, 5.5, *a* суретінен ерекшелігі) ток-



7.1.-сурет. Автотрансформаторлардың сұлбасы:

a — бір фазалы; *б* — үш фазалы; *в* — автотрансформатор сұлбасы бойынша екі орамалы трансформаторды қосу;

тардың шартты оң бағыттары емес, олардың кезең жартысы ішіндегі нағыз бағыттарының көрсетілгеніне назар аударайық.

Екі орамалы трансформатормен салыстырғанда, автотрансформатор артықшылықтарының бірі болып мыстың аз шығындалуы табылады. Негізінде, екі орамалы трансформатордағы w_1 айналым саны бар, бастапқы орама сымының қимасы I_1 тогына, ал w_2 айналым саны бар екінші айналым сымының қимасы I_2 тогына мақсатталу керек, сонда, автотрансформаторда I_2 ең үлкен ток есебінен, ораманың қандай да бір сымын таңдау қажеттілігі болмайды. Автотрансформатор орамасының айналым саны $(w_1 - w_2) I_1$ тогына, ал w_2 айналым саны — I_{12} айырымдық тогына мақсатталу керек.

Автотрансформаторға қажетті болатын шығыны (магнит өткізгішінің қимасы) екі орамалы трансформаторға қарағанда, аз болады. Мұның себебі — қуат трансформатордың бастапқы тізбегінен екіншісіне орама бөліктерін *электрлік байланыстыру* арқылы жартылай электрлік жолмен беріледі.

Екінші тізбектің толық қуаты $S_2 = U_2 I_2$. Бұл өрнекті (7.1) теңдігінен туындайтын $I_2 = I_1 + I_{12}$ теңдігін есепке ала отырып, қайта жазайық:

$$S_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{2\phi} + S_{2\text{эм}},$$

бұл жердегі $S_{2\phi}$ — толық қуаттың электрлік бөлігі, $S_{2\text{эм}}$ — магнит ағыны анықтайтын, демек, қажетті қима мен магнит өткізгішінің массасын анықтайтын электрмагнит бөлігі.

Екі орамалы трансформатормен салыстырғандағы, автотрансформатордың басқа да артықшылықтары келесідей: энергияны аз шығындайды, сондықтан ПЭК аса жоғары; жүктемені өзгерткен кездегі екінші тізбек кернеуінің аз өзгеруі.

Автотрансформаторлар трансформациялаудың шағын коэффициенттері кезінде ($k = 1...2$) пайдаланылады, себебі, бұл жағдайда, оның артықшылықтары көп мөлшерде байқалады.

Автотрансформатордың кемшіліктері болып ЖК тізбегі кернеуінің ТК тізбегіне түсу мүмкіндігі табылады, бұл қысқа тұйықталу тогының үлкен еселігін анықтайды.

Екі орамалы трансформаторлар сияқты, автотрансформаторлар да желіге қандай қысқыштардың және қандай жүктемеге қосылғанына байланысты, төмендетуші және көтеруші бола алады.

7.1, б суретінде үш фазалы автотрансформатордың сұлбасы көрсетілген, ал 7.1, в суретінде — автотрансформатор сұлбасы бойынша екі орамалы трансформаторды қосу тәсілдері көрсетілген.

Автотрансформаторлар жоғары вольтты желілерді жақын кернеулермен (мысалы, 154 және 220 кВ; 220 және 400 кВ) байланыстыру үшін; асинхронды және синхронды қозғалтқыштарды іске қосу үшін (9.4 бөлімін қараңыз); кернеуді реттеуші ретінде (бұл жағдайда, ТК тізбегіне тармақталу жылжымалы түйіспе арқылы іске асырылады) пайдаланылады.

7.2. КӨП ОРАМАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАР

Магнит өткізгіштерінде жоғары және төмен кернеуден басқа, аралық кернеу орамаларын орналастыратын көп орамалы трансформаторларды көп кернеу қажеттілігі туындаған жағдайда пайдаланады. Бірнеше екі орамалы трансформаторды қолданғаннан гөрі, көп орамалы трансформаторларды пайдалану электр қосалқы станциясын арзандатады.

Көп орамалы трансформаторлардың ерекшеліктерін, жеңілдету үшін, үш орамалы трансформаторлардың мысалында (7.2-сурет) қарастыратын боламыз. Мұндай трансформатордың магнит қозғаушы күшінің теңдігін келесі түрде жазамыз

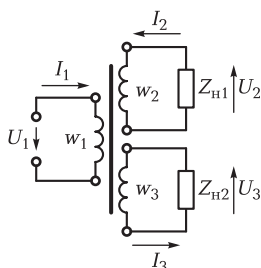
$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + I_3 w_3 = I_0 w_1 \quad (7.2)$$

((5.16) теңдеуді салыстырыңыз.: $I_1 w_1$ бастапқы орамасының МҚК магнит өткізгіште магнит ағынын туындатады және қалған орамалардың магнитсіздендіретін өрісінің орнын толтырады).

Екі орамалы үшін арналғандай жүргізілетін, үш орамалы трансформатордың бос жүру тәжірибесінен трансформациялау коэффициентін анықтайды:

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad k_{13} = \frac{w_1}{w_3} \approx \frac{U_1}{U_3}.$$

k_{12} және k_{13} біле отырып, 2 және 3 орамалары арасындағы трансформациялау коэффициентін табуға болады:



7.2.-сурет. Екі екінші реттегі орамасы бар үш орамалы трансформатор.

$$k_{23} = \frac{w_2}{w_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}.$$

Үш орамалы трансформатор үшін қысқа тұйықтаудың үш тәжірибесін орындайды:

- 1 тәжірибеде кернеу 1 орамаға беріледі, 2 орама қысқартылады, ал 3 орама ажыратылған күйде қалады;
- 2 тәжірибеде кернеу 1 орамаға беріледі, ал қысқартылатын және ажыратылатын орамалар орындарын ауыстырады;
- 3 тәжірибеде кернеу 2 орамаға беріледі, 3 орама қысқартылады, ал 1 орама ажыратылған күйде қалады.

Үш орамалы трансформатордың ерекшелігі болып екінші реттегі орамалардың өзара әсері табылады. Орамалардың бірінің жүктемесін өзгерткен жағдайда, кернеу екеуінде де өзгереді. Негізінде, екінші реттегі ораманың қандай да бір тогын өзгерту бастапқы орамада сәйкес өзгерістерді туындатады (екі орамалы трансформаторда қалай болатынын 5.2 бөлімін қараңыз.); сонымен қатар, бастапқы ораманың толық кедергісінде кернеудің төмендеуі өзгереді, ал бұл ЭҚК және екі екінші реттегі орамадағы кернеудің өзгеруіне әкеліп соғады (барлық екіншілерде - көп орамалы).

Егер, бастапқы ораманы концентрлік түрде орналасқан, екі басқа ораманың арасына жайғастырсақ, онда екі екінші реттегі ораманың өзара әсері орамалардың басқаша үйлесуіне қарағанда, аз болады (4.1, *a* суретті қараңыз.).

Үш фазалы үш орамалы трансформаторларды байланыстырудың стандартты топтары болып келесі екеуі табылады: $Y_0/Y_0/\Delta - 0 - 11$ және $Y_0/\Delta/\Delta - 11 - 11$. Бір фазалы үш орамалы трансформаторларда $I/I/I - 0 - 0$ тобын қолданады.

Үш орамалы трансформаторларды, көбінесе, үлкен қуат үшін жасайды. Екі генератор электр берудің жалпы жолына жұмыс істеген кезде, екі бастапқы және бір екінші реттегі орамасы бар үш орамалы трансформаторларды қолданады.

7.3. ӨЛШЕУІШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАР

Кернеу өлшегіш трансформаторлар (КӨТ). Айнымалы токтың электр күшін өлшейтін құралдар: вольтметрлердің, жиілік өлшегіштердің, ваттметрлердің, электр қуатын есептегіштердің, фазоме-

трлердің кернеуі бойынша шектерді кеңейтуге арналған өлшеуіштік түрленгіштер болып табылады. КӨТ жоғары кернеулі тізбектерде өлшеу кезінде пайдаланылады. (Мұндай тізбектерде тікелей өлшеуге арналған құралдар аса үлкен болар еді және де өлшеу үдерісі үлкен қауіп тудыратын еді).

Кернеу өлшегіш трансформаторының ЖК орамасы U_1 бастапқы тізбегінің кернеуіне қосылады (өлшенетін кернеу), ал ТК орамасы өлшегіш құралдарының қысқыштарына немесе өлшегіш құралының кернеу тізбегінің түйіндеріне жалғанады. Осылайша, КӨТ қосу тәсілі қуатты трансформаторды қосу тәсіліне ұқсас (5.5, *a* суретті қараңыз.), бірақ, жүктеме ретінде вольтметр, жиілік өлшегіш немесе ваттметрдің, есептегіштің, фазометрдің тізбегі бола алады. Бірнеше құралды қосу қажеттілігі туындаған кезде, олардың әрқайсына U_2 екінші кернеуі берілетіндей етіп, оларды өзара параллельді түрде байланыстырады. (4.6) өрнегімен анықталатын трансформациялау коэффициенті екінші орамаға қосылған, өлшегіш құралының өлшеу шегі қаншалықты кеңейгенін көрсетеді, және бөлгіш ретінде өрнектеледі, мысалы $\frac{10\,000}{100}$, $\frac{35\,000}{100}$, бұл жерде: алымында бастапқы ораманың номиналды кернеуі орналасқан (бұл максималды өлшенетін кернеу), вольтпен белгіленген, ал бөлгішінде — әдетте 100 В тең болатын, екінші реттегі ораманың номиналды кернеуі орналасқан.

Қуатты трансформаторлармен салыстырғанда, КӨТ жұмыс режимінің ерекшелігі болып қосылатын құрылғылардың үлкен кедергісі табылады (бос жүріске жақын тәртіп). Техникалық құжаттамамен екінші тізбекке қосылған құрылғылармен тұтылатын максималды қуат анықталады. Тұтынылатын қуат артқан кезде (сонымен қатар, параллельді қосылатын құрылғылар санының өзгеруі кезінде) екінші реттегі ораманың тогы артады және осының әсерінен екінші кернеу төмендейді. Сонымен бірге, трансформациялау коэффициентінің нақты мәні де өзгереді және тұтынылатын қуат рұқсат етілген мәннен артық болғанда, өлшеу қателіктері рұқсат етілген қателіктерден көп болады (рұқсат етілген қателік өлшегіш трансформаторының дәлдік санатымен анықталады).

КӨТ екінші орамасын қысқа етіп немесе шағын кедергіге тұйықтауға болмайды, себебі, бұл рұқсат етілмеген, үлкен мәнді бастапқы және екінші орама токтарының пайда болуына әкеліп соғуы мүмкін (5.3 бөлімін қараңыз.).

Кернеу өлшегіш трансформаторлары сұлбаларда *TV* әріптерімен

белгіленеді.

Ток өлшегіш трансформаторлары (ТӨТ). Бұл айнымалы токтың электр күшін өлшейтін құралдар: амперметрлердің, ваттметрлердің, электр қуатын есептегіштердің, фазометрлердің кернеуі бойынша шектерді кеңейтуге арналған өлшеуіштік түрленгіштер. ТӨТ үлкен мәнді токтарды өлшеу кезінде, сондай-ақ, жоғары кернеулі тізбектерде жүретін, аса үлкен болмайтын токтарды өлшеу қажеттілігі туындаған кезде, пайдаланылады.

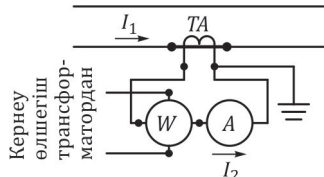
ТӨТ 7.3 - суретінде көрсетілген сұлба бойынша қосылады. Тіке сызықтың жуандатылған кесіндісі болып белгіленетін бастапқы орама I_1 тогын өлшеу керек болатын сымның ажыраған жеріне қосылады. Бірнеше аспапты қосу қажеттілігі туындаған жағдайда, әрқайсысы арқылы I_2 тогы жүретіндей етіп олар өзара кезектесіп байланысады. ТӨТ трансформациялау коэффициенті келесідей анықталады:

$$k_{\text{ИТТ}} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \quad (7.3)$$

((4.7) қатынасын қараңыз).

Осылайша, токтың төмендетуші трансформаторы бастапқы орамаға қарағанда, айналым саны көп болатын екінші орамаға ие. Сонымен қатар, бастапқы орамада тек бір ғана айналым болуы мүмкін. ТӨТ трансформациялау коэффициенті бөлгіш ретінде өрнектеледі, мысалы $\frac{100}{5}$, $\frac{600}{5}$, бұл жерде: алымында ампермен белгіленген, бастапқы ораманың номиналды тогы, ал бөлгішінде — әдетте 5 А тең болатын, екінші реттегі ораманың тогы орналасқан. КӨТ пен қуатты трансформаторларды қосу тәсілінен ерекшеленетін ТӨТ бастапқы орамасын қосу тәсілі ТӨТ жұмысының ерекшеліктерін анықтайды. Екінші реттегі ораманың қысқаштарына қысқа тұйықталу режиміне жақын болатындай қылып, амперметрлер немесе төмен кедергіге ие ваттметрлердің, өлшегіштердің, фазометрлердің ток тізбектері қосылады. ТӨТ үшін бұл тәртіп қауіпсіз болады.

Қысқа тұйықталу кезінде, бастапқы тізбекте I_1 өлшенетін ток жүреді, ал екінші тізбекте — қуатты трансформатордың жұмыс ре-



7.3.-сурет. Ток өлшегіш трансформаторды қосу сұлбасы.

жиміндегідей, магнит ағыны магниттеудің шағын тогымен анықталатындай етіп, МҚК бастапқы токтың МҚК орнын алмастыратын I_2 тогы жүреді.

Кернеу трансформаторынан айырмашылығы – ТӨТ екінші орамасын *ажыратуға болмайды*. Негізінде, екінші ораманы ажыратқан кезде, магнит өткізгіште I_1 бастапқы ораманың үлкен тогымен анықталатын, үлкен мәнді магнит ағыны туындайды. (ТӨТ қосу сұлбасынан байқағанымыздай, *бұл трансформсатордың кез келген режиміндегі бастапқы тогы, бос ток режимін қоса алғанда, сызық тогы болып табылады.*) Пайда болған ток екінші реттегі ораманың рұқсат етілмейтін, аса үлкен ЭҚК туындатады, бұл оқшауланған жерде тесіктердің пайда болуына және қызмет көрсетуші қызметкерлердің ұтылуына әкеліп соғады.

ТӨТ техникалық құжаттамасымен екінші тізбекте құрылғылармен тұтынылатын максималды қуат анықталады. Тұтынылатын қуатты арттырған кезде (сонымен бірге, тізбектеліп қосылатын құрылғылардың санын көбейткен кезде), трансформациялаудың нақты коэффициенті номиналдыдан біраз ерекшеленеді (айналым сандары қатынасының токтар қатынасына теңдігі (7.3) ары қарай дәл болмайды).

Токты өлшеуші трансформаторлар сұлбаларда ТА әріптерімен белгіленген.

7.4. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ БАСҚА ТҮРЛЕРІ

Дәнекерлеу трансформаторлары. Доғалы электр дәнекерлеуге арналған трансформаторлар — бұл номиналды бастапқы кернеуі 220 немесе 380 В болатын және номиналды екінші кернеуі 60-70 В болатын бір фазалы екі орамалы трансформатор. Мұндай екінші кернеу сенімді тұтандыру және металл электроды мен дәнекерлейтін бөлшектер арасындағы электр доғаның орнықты жануы үшін қажет.

Дәнекерлеу трансформаторының екінші орамасының бір шеті дәнекерлегіш электродымен, ал екінші шеті дәнекерлейтін бөлшекпен байланысады. Доғаны қоспастан бұрын, қысқа тұйықталу режимін жасай отырып, электродты бөлшекпен байланыстырады. Доға үзілген жағдайда, трансформатор бос жүру режимінде болады. Осылайша, дәнекерлеу трансформаторлары кідірмелі жұмыс режимімен өзгешеленеді. Доға бір қалыпты жану үшін, сыртқы сипаттаманың (екінші реттегі ораманың екінші тізбектегі токқа тәуелді болуы) тік

сипаттамаға жақын болғаны дұрыс болады, бұл электрод пен бөлшек арасындағы қашықтықтың тұрақты болмауы кезінде туындайтын кернеулердің біраз өзгерістерінде токтың аздап өзгеруіне сәйкес болады.

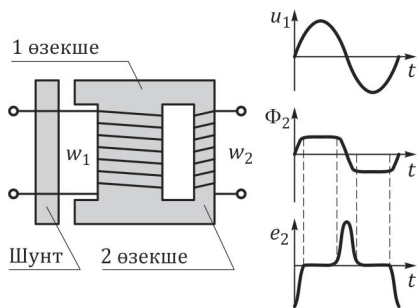
Қысқа тұйықталу режиміндегі токты шектеу үшін және сыртқы сипаттаманың тиісті формасымен қамтамасыз ету үшін, екінші реттегі орамамен, электродпен және бөлшекпен тізбектеп, екінші тізбекке жоғары индуктивті кедергіге ие дроссельді қосады. Бұл мақсатқа қол жеткізуде бастапқы және екінші реттегі орамалардың магнит өткізгіштің әр түрлі білігінде орналасуы көмегін тигізеді (бұл сейілудің магнит ағынын арттырады).

I_2 тогын реттеу үшін дроссельдің магнит өткізгішін арасында ауа саңылауы бар екі бөлшектен жасайды (орама бір бөлігінде орналасады). Сермердің көмегімен бұrandаны айналдыра отырып, саңылау шамасын өзгертеді. Нөлдік саңылауға дроссельдің максималды индуктивті кедергісі мен минималды жұмыс тогы сәйкес болады.

Пик-трансформаторлар. Синусоидалды кернеуді жартылай өткізгіш құрылғыларды басқару үшін найза пішінді кернеуге түрлендіру үшін пайдаланады (3.9 бөлімін қараңыз).

Пик-трансформатордың жұмыс қағидасы магнит өткізгіш материалының қанығу құбылысына негізделген. Магниттік шунты бар пик-трансформаторда (7.4 сурет) w_1 айналым саны бар бастапқы орама үлкен қималы 1 өзекшесінде орналасқан, ол жердегі магниттің қанығуы аса көп болмайды, сондықтан, i_1 бастапқы орамасы тогының лездік мәні артқан кезде, сызықтың заң бойынша дәл болмаса да Φ_1 магнит ағыны да артады. w_2 айналым саны бар екінші орама кіші қималы 2 өзекшеде орналасқан. Бастапқы орама тогының біршама лездік мән жағдайында осы өзекшеде магниттік қанығу пайда болады, токты әрі қарай арттырған кезде, бұл өзекшенің Φ_2 магнит

7.4.-сурет. Магниттік шунты бар пик-трансформатор.



ағыны тұрақты болып қала береді.

Сонымен, i_1 тогын өзгертумен, екі өзекшенің магнит ағыны әртүрлі өзгереді. Бірақ, магнит өткізгіш бір фазалы өзекті трансформатордағыдай, екі өзекшенің тұйық, тармақталмаған жүйесінен тұрмағанда, мұндай болмас еді, себебі, тармақталмаған магнит өткізгіштің магнит ағыны барлық қималарда бір мәнге ие болады. Пик-трансформаторларда үшінші өзекше бар — бастапқы орама жасайтын, магнит ағынының бөлігі тармақталатын магниттік шунт, себебі, бірінші өзекшенің ағыны басқа екі өзекше ағындарының сомасына тең болады:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{\text{ш}}, \quad (7.4)$$

Бұл жердегі $\Phi_{\text{ш}}$ — үшінші өзекшенің - магниттік шунттың ағыны.

Шунт магнит өткізгіштің басқа бөлігінен ауа саңылауы арқылы бөлектенген, және осының әсерінен, шунтта қанығу болмайды, сондықтан, бастапқы орама тогының артуымен $\Phi_{\text{ш}}$ ағыны сызықтық заң бойынша артады.

Егер, бастапқы орамаға берілетін кернеу синусоидалды болса (u_1 лездік мәнінің уақытқа тәуелді болу кестесі 7.4 суретте көрсетілген), онда Φ_1 магнит ағыны да синусоидалды болады. (Мұндай пікір (5.1) және (5.2) жуық теңдіктерін есепке алумен, (4.3) өрнегінен туындайды). Магниттік шунт болған жағдайда, (7.4) теңдігі орындалады, және Φ_1 мен Φ_2 ағындары әрқалай өзгеру мүмкіндіктеріне ие болады. 2 өзекшенің Φ_2 ағыны, белгілі мәнге жете отырып, магниттік қанығудың себебінен, жарты кезеңнің үлкен бөлігі ішінде тұрақты болып қала береді, бұл 7.4 - суретіндегі тиісті кестеде көрсетілген.

Екінші реттегі ораманың ЭҚК электромагниттік индукция заңына бағынады (4.1 өрнекті қараңыз), ол заңға сәйкес, магнит ағыны өзгеріссіз болса, ЭҚК ықпалдандырылмайды, және ол өзгерген жағдайда ғана пайда болады. Нәтижесінде, e_2 екінші орамасының ЭҚК лездік мәнінің уақытқа тәуелді болу кестесі 7.4. суретте көрсетілгендей, кезең сайын қайталанып тұратын шыңдар түрінде болады. Пик-трансформатордың шығыс кернеуі де осындай формаға ие ((5.2) теңдеуді қараңыз.).

Жиілік көбейткіштері. Трансформаторлардың сипатталған түрлерінен басқа, кернеу жиілігін түрлендіретін, сонымен қатар, оны 2 – 3 есеге арттыратын трансформаторлар да болады. Мұндай трансформаторлар жиілік көбейткіштері деп аталады. Олар орамалар мен магнит өткізгіштердің күрделі жүйелерінен тұрады. Көбейткіштердің қызметінде, пик-трансформаторлардың қызметіндегідей, магниттік

қанығу құбылысы үлкен рөл атқарады.

Магниттік күшейткіштер. Бұл сыртқы белгілері бойынша трансформатордың түрі ретінде қарастыруға болатын, электромагниттік аспаптар. Магниттік күшейткіштер нашар электрлік сигналды (кернеуді немесе токты өзгертуге) аса қуатты сигналға түрлендіруге арналған. Мұндай құрылғылар, сонымен қатар, тежеуіш машинасын қоздырушы токты автоматты түрде реттеу үшін мұнаралы крандарда, сондай-ақ, синхронды машинаның кернеуін түзеткіш сұлбасында қолданылады.

Қарапайым магниттік күшейткіш — Ш-тәріздес магнит өткізгіші бар бір фазалы дроссель үш өзекшеге ие. Шеткі өзекшелерде орналастырылған айнымалы токтың шарғылары бір-бірімен келесі түрде байланыстырылған — орташа өзекшеде пайда болатын немесе айнымалы магнит ағындары бір-біріне қарама қарсы бағытталған, яғни, өзара жойылады. Айнымалы токтың шарғылары тұтынушының тізбегіне қосылады және жұмыс орамасын құрайды. Магнит өткізгіштің орташа өзекшесінде тұрақты ток көзіне қосылған, басқару орамасы орналастырылған.

Айнымалы ток шарғыларының индуктивті кедергісі басқару орамасындағы тұрақты токтың мәніне тәуелді болады, бұл магниттік қанығумен түсіндіріледі (магнит өткізгіш қаныққан кезде, шарғылардың индуктивті болуы байланысты болатын, оның μ магнит өтімділігі де азаяды). Егер, басқару орамасында ток болмаса, онда жұмыс шарғыларының индуктивті кедергісі үлкен болады, және тұтынушының тогы аз мәнге ие болады. Басқару орамасының тізбегінде ток пайда болғанда, жұмыс шарғыларының реактивті кедергісі азаяды және тұтынушының тізбегіндегі ток артады.

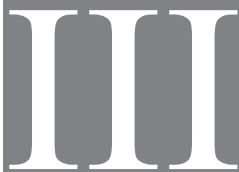
Басқару орамасы тізбегіндегі тұрақты токтың қуаттылығы тұтынушының тізбегіне қосылған, жұмыс орамасының айнымалы тогының қуаттылығынан біршама аз болады. Сондықтан, басқару орамасындағы қуатты аз шығындай отырып, жоғарғы қуатты тұтынушының тізбегіндегі айнымалы токтың шамасын реттеуге болады.

Магниттік күшейткіште бірнеше басқару орамасы болуы мүмкін. Басқару орамасының әрқайсысындағы токтың бағыты, демек, әр орама магнит ағынының бағыты орамаларды қосу сұлбасына байланысты болады. Басқару орамалары, олардың магнит ағындары қарама-қарсы бағытталып, бір-бірін әлсіздендіртіндей қосылады, ал магнит ағындары бірдей бағытқа ие болатындай етіп қосылады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Автотрансформатордың екі орамалы трансформатордан ерекшелігі неде? Автотрансформатордың екі орамалыға қарағанда қандай артықшылықтары бар? Қандай жағдайларда автотрансформаторларды пайдаланған дұрыс болады?
2. Үш орамалы трансформатордың бос жүруі мен қысқа тұйықталуының сынақтары қалай жүргізіледі?
3. Екі екі орамалы трансформатордың орнына үш орамалы трансформаторды пайдаланудың артықшылықтары қандай? Екі орамалы трансформаторлармен салыстырғанда, үш орамалы трансформаторлардың кемшіліктері неде?
4. Кернеудің өлшеуіштік трансформаторы не үшін арналған? Қуатты трансформатормен салыстырғанда, өлшеуіштік трансформатордың ерекшеліктері қандай?
5. Токтың өлшеуіштік трансформаторы не үшін арналған? Токтың өлшеуіштік трансформаторы жұмыс режимінің ерекшеліктері қандай? Бұл ерекшеліктер немен шартталған? Неге трансформатордың екінші орамасын ажыратуға болмайды?
6. Дәнекерлеу трансформаторы жұмыс режимінің ерекшеліктері қандай және бұл ерекшеліктер оның конструкциясына қандай әсер береді?
7. Пик-трансформатордың қызметі мен жұмыс қағидасы қандай?
8. Магниттік күшейткіштің қызметі мен жұмыс қағидасы қандай?

АЙНЫМАЛЫ ТОК МАШИНАЛАРЫ



БӨЛІМ

8-тарау. Жалпы мәселелер

9-тарау. Айналмалы роторы бар үшфазалы асинхронды машиналар.

10-тарау. Асинхронды машиналардың арнайы түрлері

11-тарау. Синхронды генераторлар

12-тарау. Синхронды генераторлардың параллель жұмысы

13-тарау. Синхронды қозғалтқыштар мен компенсаторлар

14-тарау. Айнымалы ток машиналарының басқа түрлері

ЖАЛПЫ МӘСЕЛЕЛЕР

8.1. АЙНАЛМАЛЫ МАГНИТ ӨРІСІ

Электр машиналары арасында үш фазалы синхронды генераторлар (әлемдегі электр энергиясының негізгі көзі) және үш фазалы асинхронды генераторлар (конструкциясы бойынша неғұрлым сенімді және қарапайым электр энергиясын механикалық энергияға түрлендіргіштер) айрықша орын алады.

Барлық айнымалы ток машиналарын жылжымайтын бөлік – статордың жалпы конструкциясын біріктіреді. Айнымалы токтың синхронды және асинхронды машиналарының ерекшеліктері ең алдымен айналатын бөліктің – ротордың конструкциясына қатысты. *Синхронды машинаның* роторы электр магнит болып келеді. Ротор айналған кезде оның магнитті өрісі ротор орамасының сымдарынан өтеді және оларда ЭҚК айнымалы шамасы болады.

Мұнда синхронды генератор мен тұрақты ток генераторының негізгі бөліктері, рөлдерінің орнын алмастыратындығын байқауға болады: синхронды генератор конструкциясының неғұрлым таралған тұрпатында магнитті өрісті *қоздыру орамасы роторда*, ал *зәкірдің орамасы — статорда* орналасқан (зәкір деп генератордың ЭҚК орналасқан бөлігі аталатындығын еске салайық, айнымалы ток генераторында айналатын бөлік ретінде зәкір қызмет атқарады, ал статорда қоздыру орамасы орналасқан (1.1, 1.2-бөлімдерін қараңыз)).

Синхронды және асинхронды қозғалтқыштар жұмысында статор орамасымен жүріп өтетін токтармен туындайтын айналып *тұратын магнитті өріс* маңызды рөл атқарады.

Синхронды машинада статордағы магнитті өрістің айналу жиілігі ротордың айналу жиілігіне тең болады, ал асинхронды машинада бұл жиіліктер тең болмайды.

Айналып тұратын магнитті өріс пайда болатын жағдайларды қарастырайық.

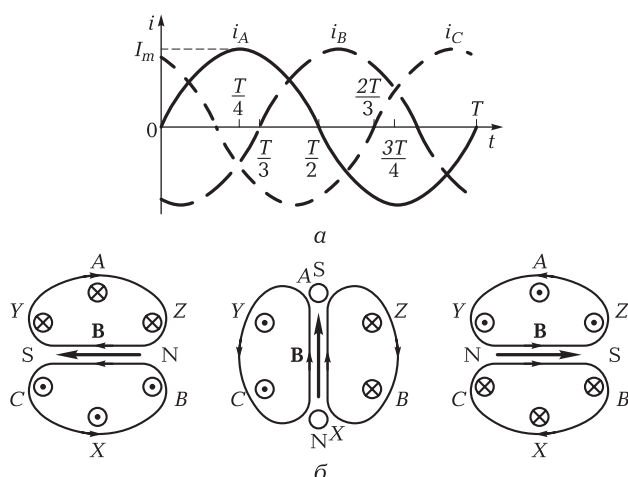
8.1, *a* суретінде үш фазалы токтар жүйесінің уақытша диаграммасы көрсетілген. Әрбір токтың лездік мәні төмендегідей уақытқа байланысты:

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad i_C = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \quad (8.1)$$

i_A тогының лездік мәні $t=0$ уақыт кезеңінде нөлге тең; осы мезеттен бастап i_A тогы оң шамаға ие болады және $t=T/4$ уақыт кезеңіне дейін ұлғаяды (токтың оң және теріс мәндеріне оның әртүрлі бағыттары сәйкес келеді). (8.1) жағдайларынан көрініп тұрғандай i_B тогы фаза бойынша i_A тогынан $2\pi/3$ радқа, яғни $1/3$ кезеңге артта қалады. Бұл 8.1, *a* суретінде көрсетілгендей *B* фазасының тогы нөлдік мәннен өтіп, *A* фазасының тогына қарағанда кезеңнің үштен бір бөлігіне кеш оң болатындығын білдіреді. i_C тогы сонымен қатар фаза бойынша i_B тогынан $T/3$, ал i_A тогынан $2T/3$, немесе $4\pi/3$ радқа артта қалады.

8.1, *б* суретінде үш шарғы жүйесі көрсетілген. Әрбір шарғы басқасына қатысты алғанда 120° орталық бұрышқа, яғни шеңбердің үштен бір бөлігіне ығыстырылған. Шарғының жақтары, суреттің перпендикуляр жазықтары тиісінше *A* және *X*; *B* және *Y*; *C* және *Z* болып белгіленген. Жазық бойымен өтетін шеткі жақтары 8.1, *б* суретінде көрсетілмеген.

Ең алдымен жеке шарғымен, мысалы *AX* шарғысымен өтетін си-



8.1.-сурет. Айналып тұратын магнитті өрістің пайда болу жағдайларын түсіндіруге:

a — үш фазалы токтар жүйесі; *б* — уақыттың әртүрлі кезеңдегі үш фазалы шарғылар жүйесіндегі магнитті өріс

нусоидалды токпен туындайтын магнитті өрісті қарастырайық. Егер уақыттың белгілі бір кезеңінде A сымымен өтетін ток *бізден бағытталса* (бұл бағыт 8.1, *б* суретінде крест белгісімен, сол дақта көрсетілген), X сымымен өтетін ток *бізге қарай* жүреді (нүктемен көрсетілген). Қол бұрғының қағидасымен анықталатын шарғы ішіндегі магнитті өріс индукциясы векторының бағыты суретте уақыттың аталған кезеңі үшін көрсетілген. Жарты кезеңнен кейін шарғыдағы токтың бағыты қарсы бағытқа өзгереді, сонымен қатар магнитті индукцияның бағыты қарсы бағытқа өзгереді. Тұрақты ток жеке шарғымен өткен кезде токтың лездік мәнінің өзгеруіне сәйкес шама бойынша өзгертін және әрбір жарты кезең сайын бағыт бойынша өзгертін өтіп тұрған магнитті өрісті аламыз.

Енді үш фазалы кернеу желісіне қосылған үш шарғы жүйесінің магнитті өрісінің сипатын айқындайық. Уақыттың қандай да бір үш кезеңін қарастырайық. 8.1, *а* - суретіне сәйкес $t = T/4$ кезеңінде i_A тогының лездік мәні оң, ал i_B және i_C токтарының лездік мәндері теріс болады. Егер шарғының A , B немесе C жағында ток бізден тысқары қарай жүретін болса, токты оң етіп, ал осы жақта (шарғының X , Y немесе Z жағында керісінше) ол бізге қарай жүретін болса, оны теріс етіп есептеміз. 8.1, *б* суретінде сол жақта $t = T/4$ уақыт кезеңіндегі токтар бағыты осы келісімге сәйкес көрсетілген.

Үстіңгі үш сымда (Y , A және Z) токтың *бізден тысқары*, ал төменгі үш сымда (C , X және B) *бізге қарай* жүретіндігін көреміз. Қол бұрғы қағидасын қолдана отырып, үстіңгі үш сымның жалпы магнитті өрісінің бір күштік желісін және төменгі үш сым өрісінің бір күштік желісін кескіндейік. Шарғылар жүйесінің ішінде бұл желілер оң жақтан сол жаққа қарай өтеді. Осы бағытқа шарғылар жүйесі өрісінің $\mathbf{B}$ магнитті индукциясының векторы бағытталған.

Осылайша, үш шарғы жүйесі токтармен уақыттың қаралып отырған кезеңінде өзінің ішінде N солтүстік полюсы оң жақта (оның ішінен шарғылар жүйесінің ішіне қарай күштік желілер шығады), ал S оңтүстік полюсы сол жақта орналасқан магниттің өрісі секілді өріс туғызады. (Шарғылар жүйесі туғызатын сыртқы өрісті қарастырған кезде солтүстік полюс уақыттың аталған кезеңінде сол жақта орналасады, бірақ бізді асинхронды немесе синхронды машинаның роторы орналасқан ішкі тұстағы өріс қызықтырады.)

$t = T/2$ уақыт кезеңінде i_A тогы 8.1, *а* суретіне сәйкес нөлге тең; i_B тогы оң, ал i_C тогы теріс болады. Токтардың, күштік желілердің және шарғылардың жалпы өрісінің магнитті индукция векторының

бағыты осы мезет үшін 8.1, б суретінде, ортасында көрсетілген. Ток өзгерген кезеңнің төрттен бір бөлігі кезінде магнитті индукция векторының айналымның төрттен бір бөлігіне бұрылғандығын көреміз.

8.1, б суретінде оң жақта кезеңнің келесі төрттен бір бөлігі кезінде токтар мен өріс кескіні көрсетілген. **В** векторы уақыттың бұл кезеңіне айналымның тағы төрттен бір бөлігіне бұрылады.

Сонымен, *біз үш шарғының төмендегі екі шарт орындалған кезде индукция векторы кеңістікте айналатын магнитті өріс тұғызатындығын анықтадық:*

- әрбір шарғы басқаларына қатысты алғанда шеңбердің үштен бір бөлігіне ығысқан;
- шарғыларда жеке токтар арасындағы фазалардың айырмасы кезеңнің үштен бір бөлігін құрайтын үш фазалы токтар жүйесі өтеді.

Шарғылар өрісінің айналу жиілігі бұл ретте токтар жиілігіне тең болады, яғни ток өзгерген кезең ішінде магнитті индукция векторы толық бір айналып өтеді. Айналу жиілігін минуттағы орамдармен өлшеу дәстүрге айналғандықтан,

$$n_1 = 60f \quad (8.2)$$

мұндағы n_1 — үш шарғы жүйесінің магнитті өрісінің айналу жиілігі, айн/мин; f —ток жиілігі, Гц.

Электротехника курсына үш фазалы токтар жүйесі өрісінің керемет қасиеті – **В** векторы модулінің *уақыт ішінде өзгермеуі* дәлелденеді. Уақыттың кез келген кезеңінде жиынтық өрістің модулі

$$B = \frac{3}{2} B_{1m}, \quad (8.3)$$

мұндағы B_{1m} — бір шарғымен жасалып өтіп тұрған өрістің магнитті индукциясының амплитудасы.

Сонымен, үш фазалы токтар жүйесінің магнитті индукция векторы модуль бойынша өзгермей кеңістікте айналады.

8.2. ҮШ ФАЗАЛЫ МАШИНАНЫҢ СТАТОРЫ

Статордың конструкциясы. Синхронды немесе асинхронды машинаның жылжымайтын бөлігі корпустан және саңылауларында үш фазалы орама тартылған өзектен тұрады. Корпус шойыннан немесе алюминий қоспасынан жасалады. Құйынды токтарды бәсеңдету үшін өзек дестеленген етіп орындалады, яғни электртехникалық болаттың

тақталарынан жиналады. Әрбір тақта сақина болып келеді, оның ішкі жағында саңылаулар жасалады. Тақталарға оқшаулатушы лак жағылады. Статордың нақты конструктивті орындалу түрі машинаның нысаналы мақсаты мен габариттік өлшемдеріне байланысты.

Статордың орамалары. Үш фазалы машиналар статорының орамалары олардың статор саңылауларында орналасуына қарай бір қабатты және екі қабатты; жасалу әдісіне қарай – қолмен басқарылатын және шаблон түрінде; полюс пен фазаға келетін саңылаулар саны бойынша – тұтас және бөлшек санды болады.

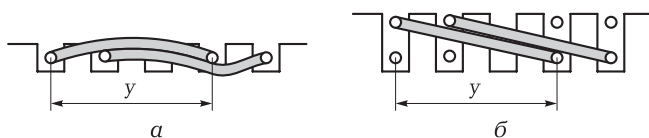
Тұрақты ток машиналары секілді саңылауларда орналасқан орамдардың бөліктері белсенді жақтар деп аталады; белсенді жақтарды жалғайтын бөліктер алдыңғы жалғаулар деп аталады.

Бір қабатты орамалар (8.2, *а* суреті) қуаты аз машиналарда қолданылады. Мұндай ораманың белсенді жақтары бір цилиндрлік бетте жатады (тураланған сұлбада — бір жазықта). Орау кезінде алдыңғы жалғауларды қолмен әртүрлі бағытта бұғу қажет.

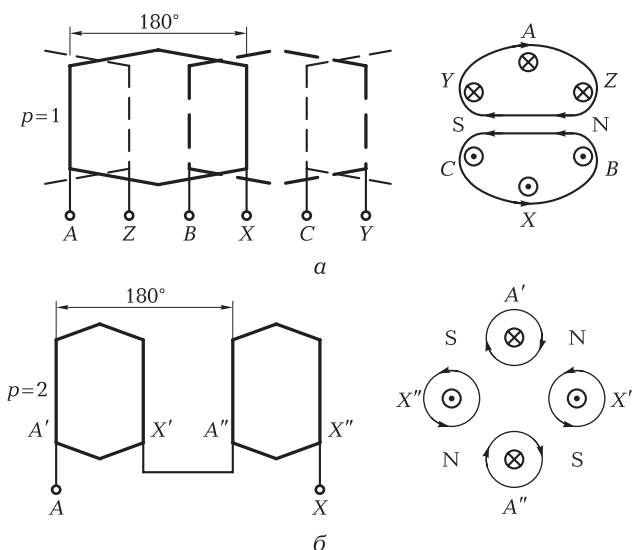
Екі қабатты ораманы (8.2, *б* суреті) бұғу қажет емес; оның барлық орамдары бірдей. Мұндай ораманы шаблон түрінде орындауға болады.

Орама шарғылардан тұрады. Қарапайым үш фазалы орама сұлба түрінде 8.1, *б* суретінде бейнеленген, оның үш шарғысы бар - әрбір фазаға біреуден. Қарапайым орамада шарғының бір белсенді жағының барлық сымдары бір саңылауда жатады. Мұндай орама *шоғырланған* орама деп аталады. Бұл жағдайда саңылаулар саны 6-ға тең: ол фазалар санын ($m = 3$) әрбір фазаның белсенді жақтар санына көбейту арқылы анықталады. Бір фазадағы белсенді жақтар саны өз кезеңінде машина полюстарының санына тең ($2p = 2$). Мұндай жағдайда полюс пен фазаға бір саңылау келеді ($q = 1$).

Полюс пен фазаға келетін q саңылаулардың тұтас саны бар орамаларда *у орама қадамы* (ол 8.2-суретте көрсетілген) *т полюстік бөлікке*, яғни көршілес әр аттас полюстер арасындағы арақашықтыққа тең. Екі полюсі бар машинада ($2p = 2$) полюстік бөлік 8.1, *б* суретін-



8.2.-сурет. Орамалар сұлбалары:
а — бір қабатты; *б* — екі қабатты



8.3.-сурет. Статордың шоғырланған орамалары және олардың магнитті өрістері:

a — $p = 1$ кезінде; $б$ — $p = 2$ кезінде (ораманың бір фазасы)

де көрсетілген қарапайым орама жағдайы секілді шеңбер ұзындығының жартысын құрайды.

8.3, a суретінде магнитті өрісі екі полюспен сипатталатын қарапайым үш фазалы ораманың – шоғырланған ораманың толық сұлбасы берілген. A фазасының шарғысы тұтас сызықпен, ал басқа екі фазаның шарғылары – сызықтарының ұзындығы әртүрлі сызықтармен кескінделген. Шарғыларды кескіндейтін сызықтардың қалыңдығы ораманың қысқыштарына баратын сызықтармен салыстырғанда шарғылардың бірден астам айналымы бар екендігін білдіреді. Бір шарғының белсенді жақтары арасындағы орталық бұрыш көрсетілген (180°). 8.3, a суретінде оң жақта ораманың белсенді жақтарын кеңістікте орналастыру және уақыттың белгілі бір кезеңіндегі магнитті өрістің жеңілдетілген суреті берілген (сондай-ақ 8.1, $б$ суретін қараңыз).

8.3, $б$ суретінде екі шарғыдан тұратын және төрт полюс жасайтын статор орамасының бір фазасы көрсетілген (суретті күрделендірмеу үшін басқа фазалар көрсетілмеген). Суретте оң жақта мұндай орамада екі полюстің қалайша пайда болатындығын көруге болады. Бір фазаның өрісі - өтіп тұрған, ал барлық үш фазаның нәтижелуші өрісі – айналатын өріс болып табылады; бұл ретте ол полюстердің

сол санымен сипатталады.

Ток өзгерген сәтте полюстердің екі жұп жағдайында магнитті өріс 360° -қа емес, 180° -қа бұрылады. 8.3, б суретінде көрініп тұрғандай, 180° — бұл бір фазадағы бірінші шарғының басы мен екінші шарғының басы арасындағы орталық бұрыш: магнитті өрістің суреті $p = 1$ жағдайымен салыстырғанда бұрыш бойынша 2 есе «нығыздалған». Полюстардың жұптар санын ұлғайтқан сайын магнитті өрістің айналу жиілігі сонша рет азаяды, өйткені кез келген жағдайда *ток өзгерген кезеңде магнитті индукция векторы екі полюстік бөлікке сәйкес келетін бұрышқа бұрылады*. Айтылғанды p полюстар жұптарының кез келген санына жиынтықтай отырып, үш фазалы машинаның статоры өрісінің айналу жиілігі мына формула бойынша анықталады деген тұжырымға келеміз

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (8.4)$$

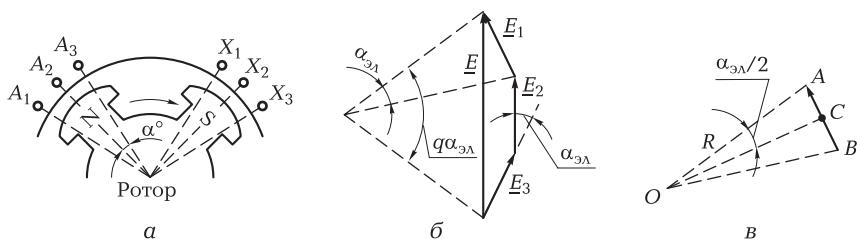
Бөлінген орамалар. Осы уақытқа дейін статорлардың шоғырланған орамалары қаралып келді. Алайда үш фазалы машиналарды жасау кезінде статорлардың орамалары *бөлінген* түрде жасалады, яғни шарғының белсенді жақтарындағы орамдар бір емес бірнеше саңылауларда орнатылады (бір шарғыны бірнеше шарғыға бөледі). Бұл ретте статордың шеңбер беті қолданылады, ал саңылаулардың көлемі шоғырланған орамадағыдай үлкен емес.

Бөлінген ораманың тағы бір маңызды артықшылығын үш фазалы синхронды генератор мысалында талдаған жөн болар, оның статор орамасында ротор айналған кезде ЭҚК үш фазалы жүйесі индукцияланады. Генераторларды құрастырған кезде оның **с п е к т р л і к қ ұ р а м ы н д а** жоғары гармоника барынша аз дәрежеде болуы үшін, оның орамасының әрбір фазасында индукцияланатын ЭҚК-ні синусоидалық шамаға барынша жақындатуға күш салынады.

Ескертпелер:

1. Фурье теоремасына сәйкес, кез келген мерзімді функцияны (сонымен қатар мерзімді өзгертін ЭҚК, кернеу немесе ток) жиіліктері еселі синусоидалы шамалардың (гармоника) жиынтығы түрінде ұсынуға болады: $f_{r1} = f$ жиіліктегі *негізгі гармоника* және $f_{r2} = 2f, f_{r3} = 3f$ жиіліктердегі *жоғары гармоникалар* және т.б.

2. Егер уақыттың мерзімді функциясы *уақыт осіне қатысты алғанда симметриялы болатын болса* (яғни егер әрбір жарты кезең ішінде функция кестесінің нысаны алдыңғы жарты кезең ішінде болғандай болып, бірақ функция белгісі қа-



8.4.-сурет. Статор орамасын бөлу бөлігі:

a — сұлба; *б* — ЭҚК диаграммасы; *в* — диаграмма үзіндісі

рама-қарсы болса), осы функцияның орналасуында f_{T3}, f_{T5}, f_{T7} және т.б. тақ санды жоғары гармоникалар ғана бар. Мұндай жағдайлар жиі іске асырылады.

3. Мерзімді функцияны жіктеуде қосылғыштың бірі ретінде тұрақты құрамдас бөлік болуы мүмкін, бірақ қаралып отырған жағдайларға мұның қатысы жоқ.

Генераторлар мен қозғалтқыштардың токтары мен кернеулерінің спектральді құрамында жоғары гармоникалардың бар болуы энергия шығысының ұлғаюына және машиналардың қосымша қызуына әкеп соғады. Электр тарату желілеріндегі жоғары гармоникалар артық кернеудің туындауына ықпал тигізеді және жақын орналасқан байланыс желілеріне әсер етеді. Электр энергиясын қабылдағыштарды қуат беру үшін әдетте синусоидалық кернеу қажет.

Шоғырланған орамамен индукцияланатын ЭҚК синусоидалық болып табылмайды; жоғары гармоникалық құрамдас бөліктер оның спектральді құрамында бірқатар амплитудалар ретінде берілген. Бөлінген орамада жоғары гармоникалар ЭҚК-ні біраз азайту есебінен едәуір басылады.

Жүйелі түрде жалғанған үш A_1X_1, A_2X_2, A_3X_3 шарғыға бөлінген статор орамасының бір фазасының бөлігі 8.4, *a* - суретінде көрсетілген. Полюстардың екі жұбының жағдайы қаралып отыр. Көрсетілген үш шарғы шоғырланған ораманың бір $A'X'$ шарғысына сәйкес келеді (8.3, *б* - суретін қараңыз). Мұндай орама полюске және $q=3$ фазасына келетін саңылаулар санымен сипатталады.

Егер синхронды генераторда статордың магнитті өрісінде полюстердің екі жұбы бар болса, ротор 8.3, *б* - суретінде көрсетілгендей полюстердің екі жұбы бар электр магнит болуы керек. Генератордың роторы жетекті қозғалтқыштан сағат тілімен айналады дерлік. Сонда A_2X_2 шарғысында индукцияланатын E_2 ЭҚК фаза бойынша

A_1X_1 шарғысында индукцияланатын E_1 ЭҚК-дан артта қалады, ал A_3X_3 шарғысында индукцияланатын E_3 ЭҚК фаза бойынша E_2 ЭҚК-дан артта қалады (әзірге сөз негізгі гармоникалар туралы болып отыр). Егер шарғылардың бастары арасындағы орталық бұрыш α ($^\circ$) шама-сына тең болатын болса, тиісті ЭҚК арасындағы фазалар айырмасы $\alpha_{эл}$ электр градустары (эл. град.) құрайды.

Ескертпе. Электр градусымен өлшенетін электр бұрышы градуспен өлшенетін геометриялық бұрышпен төмендегі формуламен байланысты болады

$$\alpha_{эл} = p\alpha^\circ \quad (8.5)$$

Солтүстік және оңтүстік полюстер арасындағы орталық бұрыш полюстердің бір жұбы кезінде секілді 180° емес 90 болатын $p = 2$ жағдайын қарастырып жатырмыз. 90° геометриялық бұрышқа бұл жағдайда 180 эл. град. электр бұрышы сәйкес келеді. Полюстер жұптарының саны кез келген болған жағдайда, ең жақын қарама-қарсы полюстер арасындағы электр бұрышы 180 эл. град. құрайды, бұл ретте $p = 1$ кезінде электр бұрышы геометриялық шамаға тең.

8.4, б - суретінде шарғыларда индукцияланатын электр қозғалтқыш күштің векторлық диаграммасы көрсетілген. Электр градусымен өлшенетін ЭҚК арасындағы фазалардың қозғалуы ескерілген (векторлық диаграммада бір геометриялық градусқа бір электр градусына тең болатын фазалық бұрыш сәйкес келген кездегі масштаб қабылданады). Шарғылар жүйелі түрде жалғанғандықтан олардың жалпы E ЭҚК күшін жеке шарғылардың ЭҚК векторлық жиынтығы немесе осы ЭҚК кешендерінің жиынтығы ретінде табуға болады. Шарғылардың ЭҚК арасындағы фазалардың нөл емес айырмасы нәтижесінде векторлық жиынтық модулі ЭҚК векторлары модульдерінің жиынтығынан аз болады.

Ораманы бөлу коэффициенті k_p шоғырланған ораманы бөлінген орамаға ауыстырған кездегі жиынтық ЭҚК-ны азайту өлшемін көрсетеді:

$$k_p = \frac{|E_1 + E_2 + E_3 + \dots|}{E_1 + E_2 + E_3 + \dots} = \frac{E}{qE_1}. \quad (8.6)$$

Қарастырылған жағдайда жиынтық үш қосылатынмен шектеледі және q саны үш мәнін қабылдайды. (мұнда ЭҚК-ның 1-, 2- және 3-ші гармоникасы емес E_1 , E_2 , E_3 белгілерімен үш шарғының ЭҚК негізгі гармоникалары белгіленген.)

Шарғының E_1 ЭҚК шамасына тең болатын AB табаны бар OAB

теңбүйірлі үшбұрышты қарастырайық (8.4, в суреті). Үшбұрыштың OA және OB бүйір жақтары шарғылардың ЭҚК векторлары ұштарының геометриялық орны болып табылатын шеңбердің R радиусына тең.

OAB үшбұрышының O төбесінен AB табанына дейін OC перпендикулярын жүргізейік. OAC тікбұрышты үшбұрышында AC катеті $\alpha_{эл}/2$ бұрышына қатысты алғанда қарсы жатқан бұрыш болып табылады. Синустың анықтамасы бойынша

$$\sin \frac{\alpha_{эл}}{2} = \frac{AC}{OA} = \frac{E_1}{2R},$$

өйткені AC кесіндісінің ұзындығы E_1 ЭҚК модулінің жартысына тең. Осыдан бір шарғының ЭҚК күшін өрнектейміз

$$E_1 = 2R \sin \frac{\alpha_{эл}}{2}.$$

Үш жарғының жиынтық ЭҚК өрнегі табанында E векторы болатын, ал бүйір жақтары R мәніне тең болатын тең бүйірлі үшбұрышты қарастырудан алынады. 8.4, б- суретінен осы үшбұрыштың төбесі кезінде бұрыштың $q\alpha_{эл}$ құрайтындығын көруге болады. Алдыңғы өрнекті толық қайталайтын қорытынды келесі тұжырымға әкеледі:

$$E = 2R \sin \frac{q\alpha_{эл}}{2}.$$

Жиынтық ЭҰК мен бір шарғының ЭҚК өрнектерін бөлу коэффициентінің өрнегіне қойып көрелік (8.6). Мынаны аламыз

$$k_p = \frac{\sin \frac{q\alpha_{эл}}{2}}{q \sin \frac{\alpha_{эл}}{2}}. \quad (8.7)$$

ЭҚК жоғары гармоникалық құрамдас бөліктері үшін көршілес саңылаулар арасындағы электр бұрышы ν гармоникасының ретімен анықталады. Мысалы, үшінші гармоника үшін ($\nu=3; f_{г3}=3f$) ол $3\alpha_{эл}$ құрайды; ν нөмірлі гармоника үшін бұл бұрыш $\nu\alpha_{эл}$ мәніне тең. ЭҚК негізгі гармоникасы өзгерген кезең кезінде, яғни ротор екі полюстік бөлікке бұрылған кезде ν нөмірлі ЭҚК гармоникасы ν өзгерістер кезеңіне ұшырайды, бұл электр бұрышының 360ν эл. градусқа өзгеруіне сәйкес келеді.

Бұл жағдайда ν нөмірлі ЭҚК гармоникалық құрамдас бөлігі үшін ораманы бөлу коэффициенті

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{q\nu\alpha_{эл}}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha_{эл}}{2}}. \quad (8.8)$$

Жоғары гармоникалар үшін бөлу коэффициентінің негізгі гармоникаға қарағанда едәуір аз болатындығын көрсетуге болады. Мұнда қаралып отырған $m=3$ (фазалар саны), $q=3$ (полкюс пен фазаға келетін саңылаулар саны), $2p=4$ (полкюстер саны) параметрлерімен сипатталатын ораманың мысалында, статор саңылауларының саны $Z_n=2mqp=36$. Саңылауларды статордың шеңбері бойымен біркелкі бөлген кезде ең жақын саңылаулар арасындағы орталық бұрыш $\alpha = 360/36 = 10^\circ$. Оған $\alpha_{эл} = p\alpha = 20$ эл. град. электр градусы сәйкес келеді. Сонда (8.7) өрнегіне сәйкес есептелген негізгі гармоника үшін k_p бөлу коэффициенті 0,96 мәніне тең болады. (8.8) формуласы бойынша 3-, 5- және 7-ші гармоникалар үшін $k_{p3}=0,67$; $k_{p5}=0,22$; $k_{p7}=0,18$ мәндері шығады.

Синусоидалық емес E ЭҚК-нің қолданылатын мәні гармоникалық құрамдас бөліктерге (тұрақты құрамдас бөлік пен жұп гармоникалар болмаған жағдайда) сәйкес келетін E_{r1} , E_{r3} , E_{r5} ЭҚК-нің қолданылатын мәндері арқылы төмендегідей өрнектеледі:

$$E = \sqrt{E_{r1}^2 + E_{r3}^2 + E_{r5}^2 + \dots} \quad (8.9)$$

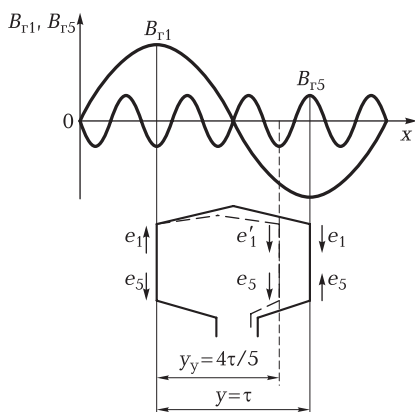
(8.9) өрнегіне ұқсас өрнек электротехника курсына синусоидалық емес ток тізбектерін талдау кезінде шығады. Бөлінген орамалар жағдайында E_{r1} , E_{r3} , E_{r5} шамаларының әрқайсысы тиісті бөлу коэффициентіне пропорционалды. Бөлу коэффициенті – бұл сандар, аз бірліктер болғандықтан осы сандардың шаршылары тиісінше коэффициенттерден аз болады, бұл бөлінген ораманы шоғырланған ораманың орнына пайдалану кезінде жоғары гармоникалардың едәуір әлсіреу фактісін түсіндіреді.

Қадамы қысқартылған орамалар. Осыған дейін у орама қадамы (8.2-суретін қараңыз) τ полюстік бөлікке тең болған кездегі толық қадаммен жүретін орамалар қарастырылған болатын. Егер орама қадамын полюстік бөліктен аз (немесе көп) жасайтын болса, ЭҚК қисығында жоғары гармоникалық құрамдас бөліктерінің қосымша басылуын қамтамасыз етуге болады. Орау материалын үнемдеу мақсатында қадамды ұзарту емес қысқарту әдісі қолданылады.

8.5-суретте жоғарыда уақыттың белгілі бір кезеңінде статор орамасында пайда болған магнитті индукцияның негізгі және 5-ші гармоникаларын *кеңістікте бөлу* көрсетілген. Көлденең ось бойымен статор шеңбері бойындағы бір саңылаудан есептелетін x координатасы жатқызылған. Негізгі гармониканың ең жоғарғы статор өрісіндегі магнитті индукция векторы, қазіргі сәтте бағытталған статордың ішкі бетіндегі нүктеге сәйкес келеді.

8.5-суретте төменде тұтас сызықпен $y = \tau$ теңдігі орындалатын

8.5.-сурет. Магнитті индукцияның негізгі және 5-ші гармоникаларын кеңістікте бөлу; орама қадамын полюстік бөліктің 1/5 шамасына қысқарту.



статор орамасының айналымы, ал штрих сызықпен – қысқартылған айналым кескінделген: $B = \frac{3}{2} B_{1m}$, 8.5-суреттің жоғарғы және төменгі бөліктерін салыстыра отырып, қысқартылған айналымның белсенді жақтары *магнитті өрістің 5-ші гармоникасына қатысты алғанда* бірдей жағдайда, яғни бірдей полярлықтың полюстары астында орналасқан. Сондықтан 5-ші гармоникамен индукцияланатын лездік e_5 ЭҚК қос жақта бір бағытқа бағытталған, ал айналымды орнату кезінде осы ЭҚК күштері қарама-қарсы, ал олардың алгебралық жиынтығы нөлге тең болып табылады.

Осылайша, статор орамасының орамдарын ЭҚК қисығындағы полюстік бөліктің бесінші бөлігіне қысқарту кезінде 5-ші гармоника болмайды.

Ораманы полюстік бөліктің жетінші бөлігіне қысқарту кезінде жетінші гармоника нөлге тең болады. Машинаның ЭҚК күшінің 5-және 7-ші гармоникасын бір уақытта бәсеңдету үшін $y_y = \frac{5}{6} \tau$, жиі қолданылады. Реттілігі жоғары гармоникалардың амплитудалары едәуір төмен болады.

3-ші гармоникаға келетін болсақ, ол әдетте басылады, өйткені электротехника курсына үш фазалы тізбектердегі жоғары гармоникаларды талдау кезінде көрсетілгендей, *желілік* ЭҚК-да 3-ші нөмірлі және 3-ке бөлінетін гармоника жоқ (ораманың барлық үш фазасының мұндай гармоникалары фаза бойынша бір-біріне сәйкес келеді, ал желілік ЭҚК фазалық ЭҚК айырмаларына тең және сондықтан нөлге тең).

Орама қадамын қысқарту ЭҚК-ның біршама азаюына әкеп соғады. Егер 8.5-суреттегі қысқартылған айналымның белсенді сол жағы

магнитті индукцияның *негізгі гармоникасын* бөлуде максимумға сәйкес келетін магнитті полюстің ортасының астында орналасады, ал оң жағы полюс ортасынан ығыстырылған және осы жақта индукцияланатын ЭҚК біршама аз: $e'_1 < y_1$. ЭҚК-ны ораманың қадамын қысқарту есебінен азайту *қысқарту коэффициентімен* сипатталады

$$k_y = \frac{E_{AX'}}{E_{AX}}, \quad (8.10)$$

мұндағы $E_{AX'}$ — қадамы қысқартылған шарғының ЭҚК күші; E_{AX} — қадамы толық шарғының ЭҚК күші.

Қадамы қысқартылған орама *q тұтас емес* параметрімен — полюс пен фазаға келетін саңылаулар санымен сипатталатынын айта кетейік.

Орама коэффициенті. Статорда индукцияланатын ЭҚК-ны бөлінген ораманы қолдану және орама қадамын қысқарту есебінен азайту $k_{об}$ *орама коэффициентімен* есептеледі:

$$k_{об} = k_p k_y \quad (8.11)$$

Магнитті кедергісі ораманың магнитті кедергісінен едәуір төмен болатын тістері болғандықтан магнитті ағынның тербелістерімен туындайтын жоғары гармоникалық ЭҚК-ны азайту үшін ротордың немесе статордың саңылаулары қисайтып жасалады (білікке параллель емес). Аталған фактор орама коэффициентін қосымша азайтады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Айнымалы ток машиналарындағы статор мен ротордың функциясы қандай?
2. Орамасында үш фазалы токтар жүйесі өткен кезде айнымалы токтың үш фазалы машинасының айналып тұратын магнитті өрісінің пайда болуын түсіндіріңіз.
3. Айнымалы ток машинасы статорының конструкциясын сипаттап беріңіз.
4. Статордың бір қабатты, екі қабатты, шоғырланған, бөлінген орамаларының ерекшеліктері қандай? Бөлінген ораманың шоғырланған орамаға қарағанда артықшылықтары қандай?
5. Ораманы бөлу коэффициенті нені көрсетеді?
6. Айнымалы токтың үш фазалы машинасындағы статордың магнитті өрісінің айналу жиілігі қандай параметрлерге байланысты?
7. Қадамы қысқартылған статор орамасы қандай мақсатта пайдаланылады? Қысқарту коэффициенті және орама коэффициенті деп нені атаймыз?

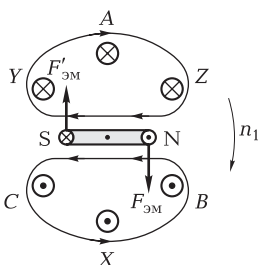
АЙНАЛМАЛЫ РОТОРЫ БАР ҮШ ФАЗАЛЫ АСИНХРОНДЫ МАШИНАЛАР

9.1. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС ҚАҒИДАСЫ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫМЫ

Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс қағидасы. 8.1-бөлімде қарастырылған шарғылар жүйесінің ішіне осьте айнала алатын, сымның тікбұрышты қысқа тұйықталған айналымын орналастырайық (9.1 сурет). Қозғалмайтын шарғылар мен осьте қозғалатын айналымнан тұратын конструкция асинхронды қозғалтқыштың үлгісі болып табылады. Бұл үлгідегі шарғылар жүйесі статордың үш фазалы орамасы болып, ал қысқа тұйықталған айналым – ротордың айналымы болып табылады. Бұл үлгідегі ротор тек қана орамадан тұрады. Үш фазалы жүйенің шарғылары бойынша ток жүрген кезде, келесі құбылыстар пайда болады.

1. Статордың айналмалы магнит өрісі пайда болады (8.1 – бөлімді қараңыз). Статор магнит өрісінің бір жұп полюсы ғана болған жағдайда, n_1 өрісінің айналмалы жиілігі (8.2) формуласымен анықталады. 8.1-бөлімде табылған өрістің айналмалы бағыты 9.1-суретте көрсетілген.

2. Айналмалы өрістің күш сызықтары қысқа тұйықталған айналымның оң және сол жақтарын кесіп өтеді, және бұл жақтарда ЭҚК ықпалдандырылады (көрсетілген жақтар *белсенді* болып табылады). Бағытты ЭҚК оң қол ережесі бойынша анықтаймыз (1.1 – бөлімді қараңыз). Бұл ереже магнит өрісінде қозғалатын өткізгішке қатысты



9.1.-сурет. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс қағидасын түсіндіретін сұлба.

қолданылатынын байқаймыз. Қарастырылып жатқан жағдайда, өріс қозғалыста, ал ротордың өткізгіштері статорға қарғанда қозғалыссыз жағдайда болады. Қозғалыстың салыстырмалы болатынын назарға ала отырып, оң қолдың үлкен саусағын өрістің айналмалы бағытында емес, керісінше, қарама қарсы бағытында, яғни, статор өрісіне қатысты айналым жағының қозғалу бағытында орналастырамыз. Сонымен бірге, магнит өрісінің сызықтары оң қолдың алақанына кіріп тұруы керек. Сонда үлкен саусаққа перпендикулярлы орналасқан төрт саусақ ЭҚК бағытын көрсетеді: айналымның оң жағында ЭҚК бізге бағытталған, ал сол жағында кері бағытталған (бұл бағыттар 9.1 суретінде көрсетілген). ЭҚК мәні (1.1) формуласымен анықталады.

3. Қысқа тұйықталған айналымда ЭҚК әрекет етуімен ЭҚК бағытында ток жүреді.

4. Айналымның жақтарында ағатын токқа статордың магнит өрісі тарабынан РЭМның электрмагниттік иінкүші әрекет етеді (Ампер күші), оның мәні (1.2) формуласымен анықталады. Электрмагнитті иінкүшінің бағытын сол қол ережесі бойынша табады және де бұл бағыт статор өрісінің айналмалы бағытымен үйлеседі. Қысқа тұйықталған айналымға әрекет ететін айналдыру кезі күштер жұбының кезі болып табылады: ол белсенді жақтар арасындағы қашықтыққа, оның бір белсенді жағына әрекет ететін электрмагнит иінкүшінің көбейтіндісіне тең.

n_2 асинхронды қозғалтқыш роторының айналмалы жиілігі әрқашан n_1 статорының магнит өрісінің айналмалы жиілігінен кіші болатыны маңызды дерек болып табылады. Шынымен, n_2 және n_1 жиіліктері тең болған кезде, статордың магнит өрісі ротор орамаларының өткізгіштерін кесіп өтпейді, яғни, айналмалы кезінің пайда болу себебі жойылады. n_2 және n_1 мәндерінің теңсіздігі осы тұрпатты қозғалтқыштың атауымен негізделген: «асинхронды» сөзіндегі грек тілінен алынған «а» қосымшасы теріс болып табылады.

Қозғалтқыш жұмыс істеген кезде, статордың магнит өрісі ротор орамаларының өткізгіштерін келесі жиілікпен кесіп өтеді

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (9.1)$$

n_s шамасының статор өрісінің айналмалы жиілігіне қатынасы сырғу деп аталады; ол s болып белгіленеді және салыстырмалы бірліктермен немесе пайыздармен көрсетіледі:

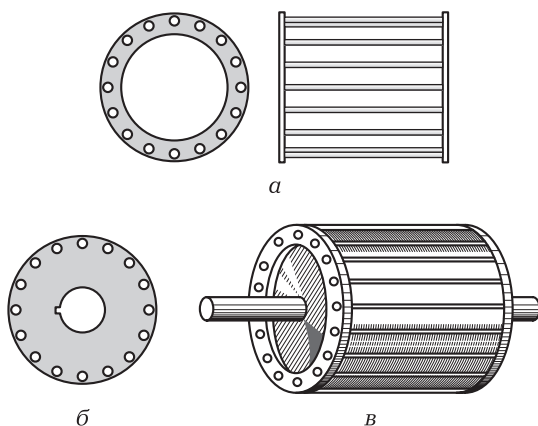
$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ немесе } s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100. \quad (9.2)$$

Қысқа тұйықталған ротор. Егер, қарастырылған асинхронды қозғалтқыштың үлгісінде қысқа тұйықталған орамдар санын өз-

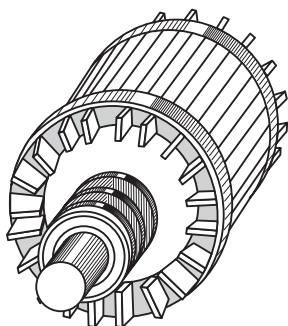
гертсек және оларды шеңбер бойынша біркелкі таратсақ, «беличья клетка» деп аталатын *ротордың орамасын* аламыз. Сонымен қатар, бұндай ораманың тұйықтаушы (шетжақтық) өткізгіштері ораманың барлық белсенді өткізгіштері – біліктері үшін ортақ болатын қысқа тұйықталған сақиналар түрінде жасалады (9.2, *а* сурет). Біліктер мен сақиналар мыс немесе алюминийден жасалады. Көп жағдайларда, ротордың орамаларын ерітілген алюминийді ротордың жабық өзектеріне құю арқылы жасайды.

Ротордың өзегін, трансформатордың магнит өткізгіші сияқты электртехникалық болаттың жеке тақталарынан, яғни, құйынды токты әлсірету үшін дестеленген етіп жасайды. Өзектің табағы 9.2, *б* - суретте, ал құрастырылған ротор — 9.2, *в* - суретте көрсетілген. Ротордағы құйынды токтардың көп емес екендігін байқайық: олар өзектің қайта магниттелу жиілігімен анықталады, ал соңғысы, статордың магнит өрісіне, яғни, n_s шама мәніне (формуласын қараңыз (9.1)) қатысты ротордың айналмалы жиілігіне байланысты анықталады. 6 % номиналды сырғуы ((9.2) формуласын қараңыз) және желінің кернеу жиілігі 50 Гц болған кезде алатынымыз: $n_s = 3$ Гц. Өзек тақталары арасындағы қажетті оқшаулауды олардың беттеріндегі оксидті таспа қамтамасыз етеді.

Ротордың өзегі алдыңғы және артқы мойынтіректі қалқандарда орналасқан, тербеліс мойынтіректерінде



9.2.-сурет. Асинхронды қозғалтқыштың қысқа тұйықталған роторы: *а* — «беличья клетка» орамасы; *б* — ротор өзегінің беті; *в* — жиналған ротор



9.3.-сурет. Асинхронды қозғалтқыштың фазалы роторы.

айналатын білікке қондырылған.

Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштар өздерінің қарапайымдылығы мен сенімділігінің арқасында кеңінен қолданысқа енді.

Фазалық ротор. Қуаты жоғары қозғалтқыштарда және де арнайы жағдайларда фазалық ротор қолданылады. Фазалық роторы бар қозғалтқыштардың қысқа тұйықталған ротордың қозғалтқыштарымен салыстырғанда, аса жоғары іске қосу және реттейтін қасиеттері бар (әрі қарай 9.7 және 9.8 – бөлімдерін қараңыз). Фазалық ротордың орамасы статор орамасына ұқсас, яғни, үш бөліктен – фазалардан тұрады (8.2 - бөлімді қараңыз). Ротордың орамасын жұлдыз тәрізді етіп байланыстырады: фазалардың шеттерін өзара біріктіреді, ал бас жақтарын білікке қатты бекітілген және біліктен де, сондай-ақ, өзара окшауланған түйіспелі сақиналарға қосады. Түйіспелі сақиналар ротордың орама тізбегінің белсенді кедергісін арттыратын (қарсылықты арттыру мағынасын, кейінірек, қозғалтқышты қосу және оның айналмалы жиілігін реттеу сұрақтарын талқылаған кезде ашамыз), үш фазалы қосушы реостаты өздеріне қосу мүмкіндіктерін береді. Фазалық ротор 9.3 - суретте көрсетілген. Алдыңғы бөлігінде түйіспелі сақиналарды көруге болады; алдыңғы және артқы шетжағы бойынша желдеткіш күрекшелер орналасқан.

Статор орамасын байланыстыру әдістері. Айнымалы ток пен статор орамаларының үш фазалы машинасының статоры туралы мағлұматтар 8.2 - бөлімде көрсетілген. Асинхронды машинаның статор фазаларын өзара және үш фазалы тормен байланыстыру әдістерін қарастырайық.

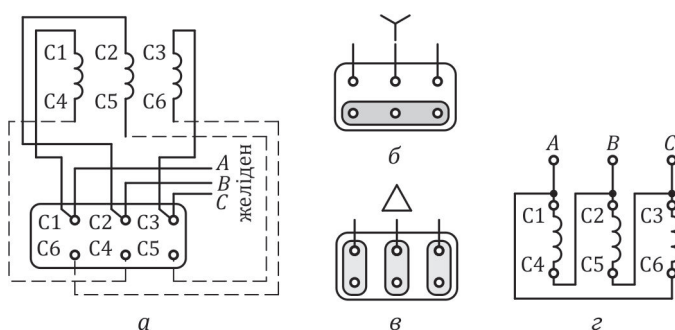
Орамалар фазаларының бас жақтары мен шеттерін машинаның корпусында орналасқан өткізу қорабының қысқышына (9.4-сурет, а) жалғайды. Орама фазаларының бас жақтары жалғанатын қораптың

қысқыштары C1, C2, C3 («С» орыс әріпі статор деген мағынаны береді) болып; ал фазалардың шеттері жалғанатын қысқыштар — C4, C5, C6 болып таңбалаңады.

Орама фазаларының шеттерін өткізу қорабының қысқыштарымен жалғайтын сымдар 9.4 - суретінде *a* нүкте сызықтарымен көрсетілген. Үш фазалы желінің сыртқы сымдары өткізу қораптарының C1, C2, C3 қысқыштарына қосылады. Қорап қысқыштарының белгіленуі суретте, орамалар фазаларының бас жағы мен шеттерінде қайта көрсетілген.

Әдетте, асинхронды қозғалтқыштар желіге $\sqrt{3}$ есеге ерекшеленетін, әртүрлі екі кернеуге қосу үшін жасалған. Машинаның корпусына бекітілген, зауыттық тақтайшада номиналды кернеу бөлшектеп жазылады, мысалы, 220/380 В немесе 380/660 В. Желінің желілік кернеуі 660 В болсын, ал қозғалтқыштың тақтайшасында номиналды кернеу 380/660 В көрсетілген. Бұл жағдайда, статордың орамасы жұлдыз ретінде жалғану керек; сонда статор орамасының әр фазасына 380 В кернеуі тіркеледі. Желінің желілік кернеуі 380 В болса, онда бұл қозғалтқыштың статор орамасы үшбұрыш ретінде жалғану керек; мұндай байланысу кезінде, желінің желілік кернеуі жүктеме фазасындағы кернеуге тең болады, яғни, бұл жағдайда да, орама фазасындағы кернеу 380 В тең болады.

Статор орамасын жұлдыз немесе үшбұрыш ретінде байланыстыру үшін өткізу қорабында жалғастырғыштарды орналастырады. 9.4, *б* - суретінде көрсетілген жалғастырғышты орнату әдісі ораманы жұлдыз ретінде жалғауға мүмкіндік береді, ал 9.4 суретке сәйкес,



9.4.-сурет. Статор орамасы фазаларының жалғануы:

a — орама фазаларының бас жақтары мен шеттерін өткізу қораптарының қысқыштарына жалғау сұлбасы; *б* — ораманы жұлдыз ретінде жалғау кезіндегі жалғаушының орналасуы; *в, г* — ораманы үшбұрыш ретінде жалғау кезіндегі жалғаушылардың орналасуы мен қағидалық сұлбасы

үш жалғастырғышты орнатқан жағдайда, үшбұрышты байланыстыру орын алады. С4, С5 және С6 қорап қысқыштарын үшбұрыш ретінде жалғау кезінде, жалғастырушылардың қиылысуын болдырмайтын тәртіпте орналастырады. 9.4, а - суреті бойынша бақыласақ, жалғастырғыштарды орнату кезінде сұлбаның барлық байланыстары 9.4- суретіне сәйкес, статордың орамасы үш бұрыш ретінде (9.4, з - сурет) байланысқанына көз жеткіземіз.

9.2. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ТЕҢДЕУЛЕРІ

Кернеулер теңдеулері. Асинхронды қозғалтқышта, трансформатордағыдай, екі орама бар. Кернеудің үш фазалы жүйесі берілетін, статордың орамасы трансформатордың бастапқы орамасына, ал ротордың орамасы екінші орамаға сәйкес. Аталған екі құрылғының ұқсастығы олардағы үдерістерді сипаттайтын теңдеулердің ұқсастығын шарттайды. Сондықтан, берілген тақырыпты зерттеместен бұрын, 5.1 және 5.2 тарауларындағы материалды қайталаған дұрыс болады, себебі, олардың ішінде теңдеулерден басқа, бұл жерде қосымша түсіндірулерсіз қолданылатын көптеген мағлұматтар бар. Әрі қарай келтірілген теңдеулерде «1» индексі статордың орамасына, ал «2» индексі — ротордың орамасына қатысты.

Статор орамасының бір фазасы үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша (5.3) теңдеуіне ұқсас теңдеуді жазайық:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = I_1 R_1, \quad (9.3)$$

Бұл жердегі $\underline{U}_1$ — орама фазасына берілетін кернеу (кешенді мағына); $\underline{E}_1$ — негізгі магнит өрісімен шартталған индукцияның ЭҚК; $\underline{E}_{\sigma 1}$ — сейілу ағынымен шартталған индукцияның ЭҚК; I_1 — статор орамасының тогы; R_1 — оның фазасының белсенді қарсылығы.

Сейілу ағынымен шартталған X_1 индуктивті кедергісі мағынасын енгізе отырып, және де ЭҚК $\underline{E}_{\sigma 1}$ (5.5) формуласы бойынша белгілей отырып, (9.3) теңдеуін қайта жазайық:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + I_1 R_1 + jI_1 X_1. \quad (9.4)$$

Мұндай түрдегі теңдеу қуат берушы кернеудің негізгі ағынмен шартталған ЭҚК орнын толтыратындығын, сондай-ақ, белсенді және индуктивті кедергілерде кернеудің төмендеуін көрсетеді. (9.4) және (5.15) теңдеулері ұқсас.

Егер, ротор қозғалмайтын (тоқтап тұрған) жағдайда механикалық түрде бекітіліп тұрса, онда қозғалтқыштың екінші реттегі орама-

сы қысқа тұйықталған трансформаторға көп деңгейде ұқсас болады (қысқа тұйықталған ротордың орамасы өте қысқа болып тұйықталған. Фазалық роторға келетін болсақ, оның қосушы және реттеуші реостатының кедергісін, егер ол шығарылмаған болса, орама кедергісінің бөлігі ретінде санауға болады, сондықтан, фазалық ротор да, өз кезегінде, трансформатордың өте қысқа болып тұйықталған екінші реттегі орамасына ұқсас болады). Бұл жағдайда, қысқа тұйықталу кезіндегі U_2 жүктеме кернеуі нөлге тең болады. Сондай-ақ, ротордың орамасында айналатын статор өрісімен ықпалдандырылған ЭҚК тек қана сейілу ағынымен шартталған, белсенді R_2 және индуктивті X_2 орамаларының кедергілерінде төмендеген кернеудің орнын толтырады:

$$\underline{E}_2 = I_2 R_2 + j I_2 X_2. \quad (9.5)$$

Бұл теңдеудің жеке жағдайын көрсетеді.

Ротор айналған кезде, (9.5) теңдеуіне кіретін шамалары, тоқтап тұрған ротор кезіндегі сандық мәндерге ие болмайды. Ротор орамасының өткізгішінде магнит өрісімен ықпалдандырылған ЭҚК күш сызықтарымен өткізгіштің қиылысу жылдамдығына пропорционалды болады ((1.1) теңдеуін қараңыз), сондықтан, ЭҚК роторға қатысты статор өрісінің айналмалы жиілігіне пропорционалды болады, мұны (2.7) формуласы көрсетеді. Тоқтап тұрған ротор үшін бұл жиілік n_1 тең, ал айналып тұрған ротор үшін — n_s тең болады ((9.1) қараңыз). Ротор орамасы фазасының ЭҚК үшін келесі пропорция дұрыс келеді:

$$\frac{E_2}{E_{2s}} = \frac{n_1}{n_s},$$

Бұл жердегі E_{2s} — айналып тұратын роторда ықпалдандырылатын ЭҚК. (9.2) өрнегіне сәйкес, $n_s = s n_1$.

Көрсетілген пропорциядан келесіні аламыз

$$E_{2s} = s E_2 \quad (9.6)$$

(s мәні бірден төмен, демек, E_{2s} мәні E_2 мәнінен төмен).

f_2 ротор тогының жиілігі сондай-ақ, статор өрісіне қатысты ротордың айналмалы жиілігіне пропорционалды болады, сондықтан

$$f_2 = s f_1, \quad (9.7)$$

бұл жердегі f_1 — ротор тогының жиілігіне (егер ол тоқтап тұрма-са) тең статор тогының жиілігі ($f_2 = f_1$ бұл жердегі $n_2 = 0$ и $s = 1$).

Сейілу ағынымен (сейілудің индуктивті кедергісі) шартталған, тоқтап тұрған ротордың индуктивті кедергісі электротехника курсынан белгілі өрнекке сәйкес, ток жиілігіне байланысты болады: $X_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2$, бұл жердегі ω_1 — статор тогының бұрыштық жиілігі; L_2 — ротордың сейілу индукциялығы. Айналып тұрған ротор сей-

$$\begin{aligned} \text{ілуінің индуктивті кедергісі } X_{2s} &= 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2. \text{ Осылайша,} \\ X_{2s} &= sX_2. \end{aligned} \quad (9.8)$$

Енді (9.5) теңдеуіне ұқсас, айналып тұрған роторда ықпалдандырылатын ЭҚК теңдеуін жазайық :

$$\underline{E}_{2s} = I_{2s} R_2 + jI_{2s} X_{2s} \quad (9.9)$$

(аз болған жеңіл әсерді елемей, R_2 белсенді кедергісін ток жиілігінен тәуелсіз деп санаймыз).

Ротор тогы. Айналып тұрған роторды тоқтап тұрған эквивалентпен алмастыру. Айналып тұрған ротордың орамасы бойынша жүретін токты (9.9) теңдеуінде көрсетейік:

$$I_{2s} = \frac{\underline{E}_{2s}}{R_2 + jX_{2s}}; \quad I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

Мұндағы, I_{2s} — кешенді токтың модулі; $\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$ — ротордың кешенді кедергі (толық кедергі) модулі.

(9.6) және (9.8) өрнектерін есепке алып, келесіні жазамыз

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + sX_2^2}}. \quad (9.10)$$

(9.10) теңдеуінің алымы мен бөлгішін s сырғуына бөле отырып, келесіні аламыз

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}. \quad (9.11)$$

Қозғалтқыштың білігіндегі механикалық жүктемені арттыру кезінде, s жылжуы артады (тежелу сәті қаншалықты үлкен болса, асинхронды қозғалтқыш роторының айналмалы жиілігі соншалықты төмен болады). Сол кезеңде, ротор орамасының ЭҚК мен сейілдудің индуктивті кедергісі артады, бұл (9.10) теңдеуінде көрсетілген. (9.11) теңдеуі деректердің басқа түсіндірмелерін береді. Бұл жағдайды келесі түрде көрсетеді – ЭҚК мен индуктивті кедергі сырғуы өзгерген жағдайда өзгермейді, ал белсенді кедергі өзгереді. (9.11) теңдеуін жаза отырып, біз айналып тұрған роторды эквивалентті тоқтап тұрғанмен алмастырдық деп есептеуге болады. Бұл теңдеуден байқағанымыздай, сырғанаудың артуы белсенді кедергінің төмендеуіне баламалы болады. Бұл трансформатор күштемесінің артуы, яғни, оның орамаларында токтың артуы қуат қабылдағышы кедергісінің төмендеуі кезінде орын алады.

Білікте пайдалы механикалық күштеме болмаған жағдайда (қозғалтқыштың бос жүрісі кезінде), сырғанау нөлге жақын болады (ротордың айналмалы жиілігі статор өрісінің айналмалы жиілігіне жақын), ал тиімді белсенді кедергі (R_2/s) үлкен сандық мәнге ие болады («тиімді

кедергі» термині ротор тогының осы шамаға байланысты болатындығын көрсетеді, алайда, ротор орамасының нақты белсенді кедергісі тұрақты шама болады). Қозғалтқыштың бұл режиміне трансформатордың бос жүріс режимі ұқсас болады – оның екінші реттегі орамасының қысқыштары арасындағы кедергі шексіздікке бағытталады.

Айналмалы роторды баламалы тоқтап тұрғанға алмастыру кезінде, (9.9) теңдеуі келесі теңдеуге ауысады

$$\underline{E}_2 = I_{2s} \frac{R_2}{s} + j I_{2s} X_2. \quad (9.12)$$

токтардың үш фазалық жүйесі f_1 жиілігімен жүретін статор орамасы статорға қатысты, n_1 жиілігімен айналатын магнит өрісін жасайтындығы анықталған болатын. Осылайша, жиілігі $f_2 = s f_1$ ротор токтары роторға қатысты, n_s жиілігімен айналатын өрісті жасайды ((9.1) өрнегін қараңыз). Бұл өрістің *статорға қатысты*, n_s және n_2 жиіліктері сомасына тең жиілікпен айналатыны анық болды. (9.1) өрнегі бұл соманың n_1 жиілігіне тең екендігін байқаймыз. *Осылайша, статор мен ротордың магнит өрістері статорға қатысты бір жиілікпен айналатындығы анықталды, демек, олар бір біріне қатысты тыныштықта орналасқан.*

9.3. РОТОР ОРАМАСЫ ПАРАМЕТРЛЕРІН СТАТОР ОРАМАСЫНА КЕЛТІРУ

Ротор орамасы фазасының ЭҚК келтіру. Асинхронды қозғалтқышты сипаттайтын параметрлерді трансформатор параметрлерімен салыстыруды жалғастырамыз.

Трансформацияның трансформациялау коэффициенті (4.6) өрнектерімен анықталады. Асинхронды қозғалтқыштың ЭДС k_c *трансформациялау коэффициентін* E_1 статор орамасы фазасының ЭҚК E_2 тоқтап тұрған ротор орамасы фазасының ЭҚК қатынасы ретіндегі мағынаны енгізейік. Алайда, бұл қатынас, айналым сандарының қатынасына тең болмайды, себебі, таратылған ораманы пайдалану мен орама аралығын қысқарту ЭҚК азайтады. Оның азайту шамасы болып, (8.11): $k_{\phi} = k_p k_y$ (k_p тарату коэффициентінің және k_y қысқарту коэффициентінің мағынасы 8.2 тарауда берілген) өрнегімен анықталады, орама коэффициенті табылады. Онда, статор орамасы фазасының ЭҚК мен тоқтап тұрған ротор үшін келесі өрнектер сәйкес келеді:

$$E_1 = 4,44 w_1 f_1 \Phi k_{\phi 01}; E_2 = 4,44 w_2 f_1 \Phi k_{\phi 02}. \quad (9.13)$$

Бұл жердегі Φ — n_1 жиілігімен айналатын, модуль бойынша тұрақты статордың магнит ағыны. Берілген өрнектер (4.5) трансформатор орамаларының ЭҚК өрнектерінің негізінде жазылған.

Е с к е р т у. Синусоидалдық кернеу желісінен қуат беретін трансформатор орамаларында, Φ_{0m} амплитудасымен синусоидалды магнит ағынымен ЭҚК пайда болады. Асинхронды қозғалтқыш орамаларында модуль бойынша өзгермейтін, айналмалы ағынмен ЭҚК пайда болады. Қандай да бір оське айналып тұрған вектордың проекциясы синус заңы бойынша өзгертіні анық, бұған қоса проекцияның амплитудасы вектор модуліне тең болады. Осылайша, трансформатордың жеке айналымы арқылы және асинхронды қозғалтқыштың статор немесе ротор орамасының жеке айналымы арқылы магнит ағынының өзгеру жолу бірдей болады. Бұл (9.13) өрнектерінің орынды екендігін байқатады.

Алдында баяндалған асинхронды қозғалтқыштың ЭҚК трансформациялау коэффициенті келесідей өрнектеледі:

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{061} w_1}{k_{062} w_2}. \quad (9.14)$$

Асинхронды қозғалтқыштағы үдерістерді талдау ыңғайлылығы және оның алмастыру сұлбасы мен векторлы диаграммасын оңай құру үшін трансформаторлар үшін жасалатындай (5.2 - бөлімін қараңыз), айналым сандары мен статор орамасы фазаларының санына қатысты ротор орамаларының параметрлерін келтіреді. Тұтынатын қуаттың, шығындар қуатының және МҚК мәндерін сақтап қалу, келтірудің міндетті шарты болып табылады.

E'_2 роторы фазасының ЭҚК келтірілген мәні (9.14) өрнегін пайдаланумен анықталады:

$$E'_2 = E_1 = E_2 k_e = E_2 \frac{k_{061} w_1}{k_{062} w_2} \quad (9.15)$$

((5.19) өрнегімен салыстырыңыз).

Ток пен ротор кедергісін келтіру. 5.2 бөлімде жасалғандай, келесі қорытындыны алуға болады - ток өзгерсе де өзгермейтін (қозғалтқыш білігіндегі жүктеме өзгерген жағдайда, ток та өзгереді) магнит ағыны I_1 статор орамасының тогын жасайды. Расымен де, негізгі магнит ағынымен пайда болған, E_1 статор орамасы фазасының ЭҚК орамасымен салыстырғанда, статор орамасының белсенді кедергісіндегі $I_1 R_1$ кернеуінің төмендеуі және сейілудің индуктивті кедергісіндегі $I_1 X_1$ кернеуінің төмендеуі аса жоғары болмайды, бұл

жағдайда, (9.4) теңдеуінен шамамен келесі теңдікті алуға болады $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$, бұл жерде $\underline{U}_1$ — желінің фазалық кернеу кешені ((5.1) теңдігін қараңыз). Осылайша, өзгермейтін жеткізу кернеуі кезінде, E_1 ЭҚК жасайтын, магнит ағыны да өзгеріссіз қалады.

Асинхронды қозғалтқыштың бос жүрісі кезінде, яғни, нөлге жақын s жылжу мәні кезінде (ротор шамамен статор өрісінің айналымды жылдамдығымен жылжыған кезде), I_0 статордың бос жүріс тогы $I_0 m_1 k_{o61} w_1$ магнит қозғаушы күшін жасайды, бұл жердегі статор фазасының саны $m_1 = 3$. Бос жүріс режиміндегі ротор тогы аз, мұны (9.10) және (9.11) теңдеулерінен байқауға болады.

Магнит ағынын жасау кезінде, қозғалтқыш жүктемесі режимінде ($s \neq 0$ кезінде) статордың да, ротордың да тогы қатысады. Жалпы МҚК машинаның екі бөлігі орамасының кешенді МҚК сомасынан анықталады ($I_0 m_1 k_{o61} w_1 + I_{2s} m_2 k_{o62} w_2$). Жүктеме режиміндегі магнит ағыны бос жүріс кезіндегідей болғандықтан, келесіні жазуға болады

$$I_0 m_1 k_{o61} w_1 + I_{2s} m_2 k_{o62} w_2 = I_0 m_1 k_{o61} w_1. \quad (9.16)$$

Көрсетілген теңдеу трансформатордың МҚК теңдеуіне ұқсас (5.16), асинхронды қозғалтқыштың МҚК теңдеуі болып табылады.

m_2 ротор орамасының фазалар сандарының мағынасын түсіндірейік. Фазалық ротор орамасы статор орамасына ұқсас, және де екі ораманың саны да үшке тең. Қысқа тұйықталған роторға келетін болсақ, онда оның орамасы фазаларының саны ретінде әрқайсысы екі өзектен тұратын, оның айналым санын қабылдауға болады. Басқа сөзбен айтқанда, мұндай ротор фазаларының саны «Беличья клетка» өзектері жұптарының санына тең. Онда, бір фазаның w_2 айналым саны бірге тең екендігі айқын болады (фазалар саны ретінде кейбір кезде өзек сандарын алады, сонда фаза орамдарының саны 0,5 тең болады, себебі, $m_2 w_2$ көбейтіндісі де сондай болу керек).

(9.16) теңдігін $m_1 k_{o61} w_1$ бөле отырып, алатынымыз:

$$I_1 + I_{2s} \frac{m_2 k_{o62} w_2}{m_1 k_{o61} w_1} = I_0; \quad I_1 = -I_{2s} \frac{m_2 k_{o62} w_2}{m_1 k_{o61} w_1} + I_0.$$

Соңғы теңдіктің мағынасы келесідей: статор тогы ротор тогының магнитсіздендіру әрекетін алмастырады және өзгермейтін магнит ағынын тудырады.

Келесі белгіні енгізейік

$$k_i = \frac{m_1 k_{o61} w_1}{m_2 k_{o62} w_2}. \quad (9.17)$$

k_i шамасы *токты трансформациялау коэффициенті* болып табылады. Осыны есепке ала отырып, алдыңғы теңдеуді қайта жазайық:

$$\underline{I}_1 = -\frac{\underline{I}_{2s}}{k_i} + \underline{I}_0.$$

$\underline{I}'_{2s}$ келтірілген ротор тогы мағынасын енгізейік:

$$\underline{I}'_{2s} = \frac{\underline{I}_{2s}}{k_i} \quad (9.18)$$

((5.17) өрнегімен салыстырыңыз).

Енді статор тогын келесі түрде жазуға болады:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_{2s} + \underline{I}_0, \quad (9.19)$$

бұл (5.24) теңдеуін қайталайды.

(9.17) және (9.14) өрнектерін салыстыра отырып, ЭҚК трансформациялау мен ток коэффициенттері арасындағы байланысқа қол жеткіземіз:

$$k_i = \frac{m_1}{m_2} k_e. \quad (9.20)$$

R'_2 ротор орамасының келтірілген белсенді кедергісін анықтау кезінде, бастапқы және келтірілген орамалардағы электр шығындарының қуаттылықтары бірдей болу керектігін ұмытпаймыз. Сондықтан,

$$m_2 I_{2s}^2 R_2 = m_1 (I'_{2s})^2 R'_2; \quad I_{2s}^2 R_2 = \frac{m_1}{m_2} \frac{I_{2s}^2}{k_i^2} R'_2,$$

бұл жерде (9.18) өрнегі қолданылды. Бұл жерден табатынымыз

$$R'_2 = R_2 \frac{m_2}{m_1} k_i^2.$$

(9.20) трансформациялау коэффициенттері арасындағы байланысты есепке ала отырып, келесі өрнектерді аламыз:

$$R'_2 = R_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2, \text{ немесе } R'_2 = R_2 k_e k_i \quad (9.21)$$

(трансформатор үшін (5.21) өрнегімен салыстырыңыз).

X'_2 ротор орамасы сөйлеуінің индуктивті кедергісін анықтау кезінде, ЭҚК мен бастапқы және келтірілген қозғалтқыштың тогы арасындағы фазалардың жылжу бұрышын негізге аламыз. Бұл шарт келтірілген индуктивті және белсенді кедергі мәндері бастапқы мәндер қатынасына тең болған жағдайда ғана орындалады. Сондықтан, келтірілген индуктивті кедергі, келтірілген белсенді кедергісі сияқты, бастапқы белсендіге (9.22) байланысты болады:

$$X'_2 = X_2 \frac{m_1}{m_2} k_e^2, \text{ немесе } X'_2 = X_2 k_e k_i. \quad (9.22)$$

Енді, (9.12) ротор фазасы кернеуінің теңдігін келтірілген шама-

лар арқылы қайта жазамыз:

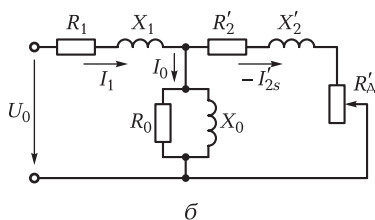
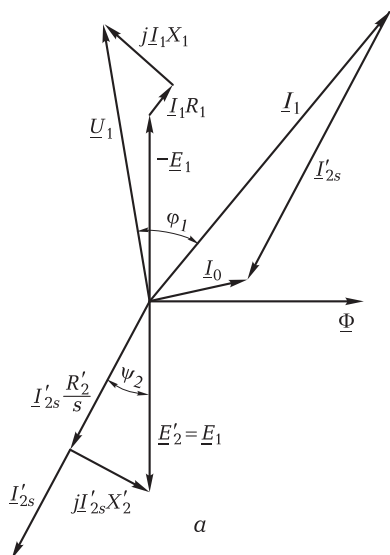
$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_{2s} \frac{R'_2}{s} + j \underline{I}'_{2s} X'_2. \quad (9.23)$$

Векторлық диаграмма және асинхронды қозғалтқыштың алмастыру сұлбасы. Қозғалтқыштың бір фазасының векторлық диаграммасы (9.19) токтар теңдіктері және (9.4), (9.23) кернеу теңдіктері негізінде құралады.

Көрсетілген екі теңдіктердің бастапқы екеуінің түрі трансформатордағы үдерістерді сипаттайтын, тиісті теңдіктерге ұқсас болады. Алайда, асинхронды қозғалтқыштың бос жүріс тогы номиналды токтың 20...35% құрайды, ал бұл кезеңде трансформатордағы бұл мән 5...10% құрайды.

Мұндай құбылыстың себебі болып келесі табылады – қозғалтқыштың магнитті жүйесінде, магнит ағынының жүру жолының магниттік кедергісін біраз арттыратын ауа саңылауы бар және де берілген ағынға қол жеткізу үшін (ол келтірілген кернеумен анықталады) трансформатордағыдай емес, магниттеудің үлкен тогы қажет.

(9.23) теңдеуі (5.23) теңдеуінен U'_2 кернеуінің болмауымен ерекшеленеді (қозғалтқыш білігіндегі жүктеменің өзгеруі кезінде, R'_2/s кернеуінің өзгеріске ұшырауына қарамастан, ол (9.23) теңдеуінде жүктеме кедергісінің емес, қысқа тұйықталудың белсенді кедергісін көрсетеді). Асинхронды қозғалтқыштың векторлық диаграммасын



9.5.-сурет. Асинхронды қозғалтқыштың жүктеме режимін графикалық көрсету:

а – векторлық диаграмма; б – қозғалтқышты алмастыру сұлбасы

(9.5, а сурет) трансформатордың векторлық диаграммасымен салыстырған дұрыс болады (5.4 суретін қараңыз).

Назарымызды екі жағдайға аударайық. Біріншіден, трансформатордың диаграммасымен көбірек салыстыру үшін асинхронды қозғалтқыштың ток диаграммасы (9.19) теңдігінің тікелей салдары болып табылатын, $I_1 + I'_{2s} = I_0$ түріндегі токтар теңдеуіне сәйкес құрастырылған. (Мұндай жазбада магниттеу тогына жақын бос жүріс тогы статор мен ротордың МҚК біріккен әрекетінің нәтижесі ретінде көрініс табады.)

Екіншіден, трансформатордың диаграммасында $\underline{U}'_2$ векторы $\underline{E}'_2$, $(-I'_2 R'_2)$ және $(-jI'_2 X'_2)$ үш векторының сомасы ретінде құралған, бұл (5.23) түріндегі екінші реттегі ораманың кернеулер теңдеуіне сәйкес болады. Сонымен бірге, $(-I'_2 R'_2)$ векторының бағыты $\underline{I}'_2$ векторы бағытына қарама қайшы келеді. (9.23) теңдеуіне сәйкес, асинхронды қозғалтқыш диаграммасында $\underline{E}'_2$ векторы $\underline{I}'_{2s} R'_2/s$ және $jI'_{2s} X'_2$ векторларының сомасы ретінде көрініс табады.

Ток пен кернеу арасындағы фазалардың жылжу бұрышын ϕ әріппен белгілейді, ал ток пен ЭҚК арасындағы фазалардың жылжу бұрыштарын көбінесе ψ әріппен белгілейді. Осыған сәйкес, 9.5 суретінде ϕ_1 және ψ_2 белгілері пайдаланылған.

Асинхронды қозғалтқыштың векторлық диаграммасына 9.5, б - суретінде көрсетілген, алмастыру сұлбасы жауап береді, ол жердегі статор мен ротордың электромагниттік байланысы электрлікке ауыстырылған (5.5, б суретімен салыстырыңыз). Алмастыру сұлбасы бойынша келесі тұжырымдаманы жасаймыз.

1. Алмастыру сұлбасын құрастыру кезінде, статор тогы бос жүріс тогына және ротор тогына бөлініп көрсетілген, (9.19) түріндегі токтар теңдігі пайдаланылды.

2. I_0 бос жүріс тогы, өз кезегінде, магниттік шығындармен пайда болған, (5.8) теңдеуіне сәйкес, I_{0a} белсенді құраушы және магниттеу ағынын анықтайтын, I_{0p} реактивті құраушы ретінде көрсетілген. I_0 тогымен алмастыру сұлбасының тармағына және осы тармақтың R_0 және X_0 элементтеріне қатысты пікірлер векторлық диаграмма мен бос жүріс режиміндегі трансформатордың алмастыру сұлбасын қарастыру кезінде (5.1 бөлімін қараңыз) айтылады.

3. Асинхронды қозғалтқыш пен трансформатордың алмастыру сұлбасының ұқсастығын R'_2/s белсенді кедергісін екі кедергі сомасында көрсету толықтырады:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_L,$$

Бұл жердегі R'_d — айналып тұрған ротордың қысқа тұйықталу кедергісін R'_2 тоқтап тұрған ротордың қысқа тұйықталу кедергісіне (9.2-бөлімін қараңыз) қатысты арттыруын көрсететін қосымша кедергі.

Қозғалтқышты алмастыру сұлбасында R'_d кедергісі трансформатордың алмастыру сұлбасындағы жүктеме кедерегісі алып тұрған орынды алады. Соңғы теңдіктен R'_d қосымша кедергісінің R'_2 кедергісімен байланысын аламыз:

$$R'_d = R'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (9.24)$$

(9.24) теңдеуі сырғудың азаю нәтижесінде қосымша кедергінің төмендеуін көрсетеді. Сырғудың артуы механикалық жүктеме осы кенде пайда болады; сонымен бірге, бір мезгілде, ротордың тогы артады. Механикалық жүктемені арттыра отырып, біз ($s = 1$) ротордың толық тоқтауына қол жеткіземіз. Күткеніміздей, қосымша кедергі нөлге тең болады, себебі, айналым болмаған жағдайда, алмастыру сұлбасының оң жақ тармағының белсенді кедергісі минималды болуы қажет және R'_2 тең болуы керек.

9.4. ПӘК ПЕН АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ ЭНЕРГИЯСЫН ЖОҒАЛТУ

Қозғалтқышпен желіден тұтынылатын P_1 қуаты m_1 статор орама-сы фазаларының санымен, орама фазасына берілетін U_1 кернеуімен, орама фазасындағы I_1 тогымен және ток пен φ_1 кернеуі арасындағы фазалардың жылжу бұрышымен анықталады:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (9.25)$$

P_2 қозғалтқыштың пайдалы қуаты — бұл тұтылатын қуаттан $\sum P$: $P_2 = P_1 - \sum P$ шығындарының жиынтық қуаттарының шамасына аз, біліктегі механикалық қуаттылық. Тұтылатын қуаттан пайдалы қуатты құрайтын үлесті салыстырмалы бірліктермен немесе жалпы формула бойынша пайыздарда есептелетін, η қозғалтқыштың пайдалы әрекет ету коэффициентімен анықтайды

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \text{ немесе } \eta = \frac{P_2}{P_1} 100. \quad (9.26)$$

Тұрақты ток қозғалтқышы үшін (3.5) теңдіктерінің тізбекшесінде келтірілетіндерге ұқсас, ПӘК өрнектеудің басқа да нұсқалары бар.

Қуаты 1 ден 20 кВт дейін болатын қозғалтқыштарда, номиналды жүктеме кезіндегі ПӘК 75...90 % құрайды; аса қуатты машиналарда

ол 95 % дейін жетеді.

Шығындардың толық қуатына келесі енеді:

- Статор орамаларындағы электр шығындарының қуаты $P_{об1} = m_1 I_1^2 R_1$;
- Статор өзегіндегі магнит шығындарының қуаты (гистерезис пен құйынды токтарға жұмсалатын болат шығындары) P_{c1} ;
- Ротор орамаларындағы электр шығындарының қуаты $P_{об2} = m_2 I_2^2 R_2$;
- Мойынтіректегі үйкеліс және ауа кедергісімен пайда болған $P_{мех.п}$ механикалық шығындарының қуаты; сондай-ақ, фазалық роторы бар қозғалтқышта механикалық шығындар щеткалардың ротордың түйіспелі сақинасына үйкелуімен пайда болады;
- Жеке жағдайларда, тістердегі магнит индукциясының соғуымен және МҚК жоғарғы гармоникасының болуымен пайда болатын, $P_{доб}$ қосымша шығындар қуаты. Қосымша шығындарды есепке алу қиын; әдетте, оларды P_1 тұтылатын қуатының 0,5 % тең етіп алады.

Келтірілген тізімде ротордағы магниттік шығындардың қуаты жоқ. Себебі, ротордың өзегі қозғалтқыштың жұмыс режимінде $f_2 = sf_1$ төмен жиілігімен қайта магниттеледі ((9.7) формуласын қараңыз), сондықтан, гистерезис пен құйынды токтан пайда болған шығындар аса көп болмайды.

$P_{об1}$ және $P_{об2}$ электр шығындары, сондай-ақ, $P_{доб}$ қосымша шығындары қозғалтқыштың жүктемесіне, яғни, ротор мен статор орамаларындағы токтарға байланысты болады, сондықтан, олар айнымалы шығын болып табылады. P_{c1} магниттік және $P_{мех.п}$ механикалық шығындар көп жағдайларда жүктемеге байланысты болмайды, келесі жағдайдан басқа – жүктеме өзгерген жағдайда, айналмалы жиілігі біраз өзгереді, бұл қозғалтқыштың магнит жүйесінің қайта магниттелу жиілігінің біраз өзгеретінін көрсетеді.

$P_{эм}$ *электрмагниттік қуаты* — бұл ауа саңылауы арқылы статордың айналмалы магнит өрісімен роторға берілетін қуаттылық. Осы анықтамаға сәйкес, $P_{эм}$ қуаты тұтылатын қуаттылықтан статор орамасы мен оның өзегіндегі шығындар шамасынан төмен:

$$P_{эм} = P_1 - (P_{об1} + P_{c1}). \quad (9.27)$$

Айналмалы ротор тарататын P_2^* қуаты электрмагнит қуатынан ротордағы электр шығындары шамасына төмен ($P_2^* = P_{эм} - P_{об2}$) және

біліктегі тиімді қуаттылықтан механикалық шығындар шамасына көп: $P_2^* = P_2 + P_{\text{мех.п.}}$

9.5. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ

Электрмагнитті иінкүш. Қозғалтқышпен таралатын электрмагнит иінкүші роторға статордың айналмалы өрісімен (9.4 бөлімін қараңыз) және Ω_1 өрісі айналмалы бұрыштық жылдамдығымен берілетін, $P_{\text{эм}}$ электрмагнит қуатымен анықталады:

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_1}. \quad (9.28)$$

Ескерту:

1. F күші әрекет ететін, дененің ілгерілемелі қозғалысы кезінде, бұл күштің қуаты $P = Fv$ анықталады, бұл жердегі v — қозғалыстың шапшаң жылдамдығы. M иінкүші әрекет ететін, айналмалы дене қуатының формуласы ілгерімелі қозғалысты сипаттайтын шамалардың $P = M\Omega$ айналуын көрсететін, тиісті шамаларға алмасуы болып табылады. Бұл жерде (9.28) формуласы белгілі болды. Алайда, формуланың қозғалтқыш білігіндегі кезді емес, роторға ауа саңылауы арқылы берілетін кезді анықтайтынын ұмытпайық.

2. Ω_1 бұрыштық жылдамдығы мен n_1 жиілігі арасындағы байланыс (3.13) формуласымен беріледі.

Қозғалтқышпен желі арқылы тұтылатын P_1 қуаты (9.25) өрнегімен анықталады. Роторға берілетін, $P_{\text{эм}}$ электрмагнитті қуаты үшін осыған ұқсас өрнекті жазуға болады: $P_{\text{эм}} = m_2 E_2 I_{2s} \cos \psi_2$. Бұл жерде айналымдағы роторды эквивалентті тоқтап тұрғанмен алмастыру есепке алынған (9.2.2 бөлімін қараңыз.), яғни, ротор орамасындағы ЭҚК сырғуға байланысты болмайды, ал I_{2s} ротордағы ток (9.11) формуласымен белгіленеді. Статор орамасына шамалардың келтірілгенін пайдалана отырып (9.3 бөлімін қараңыз.), келесіні жазамыз: $P_{\text{эм}} = m E_2' I_2' \cos \psi_2$. Электрмагнит қуатының дұрыстығын 9.5 а суретінде көрсетілген, векторлық диаграмманың жоғары және төменгі бөліктерін салыстырумен, (9.25) өрнегімен және электрмагниттік қуаттылық өрнегімен түсіндіруге болады. Сонымен бірге, ротор тізбегі фазасындағы E_2 ЭҚК әрекеті E_2 тең, кернеуі бар көздің болуына эквивалентті екенін естен шығармауымыз керек.

E_1 ЭҚК арналған өрнектен (9.13) және E_2' ротордың келтірілген

ЭҚК мен E_1 статордың ЭҚК ((9.15) форм.кар.) тендеуінен келесіні аламыз: $E'_2 = 4,44w_1 f_1 \Phi k_{\text{об1}}$. Сонда, электрмагнит қуаты үшін келесіні алуға болады

$$P_{\text{эм}} = m_1 4,44 w_1 f_1 \Phi k_{\text{об1}} I'_{2s} \cos \psi_2.$$

Ω_1 статор өрісі айналуымен бұрыштық жылдамдығы E_1 ЭҚК және келтірілген E'_2 ЭҚК ((3.13) және (8.4) өрнекті қараңыз.) бар, f_1 жиілігіне пропорционалды болып келеді. Егер, электрмагнит қуатын Ω_1 бұрыштық жылдамдығына бөлсек, онда, (9.28) формуласына сәйкес, M электрмагнит иінкүшінің өрнегін аламыз, ол жердегі Φ , I'_{2s} және $\cos \psi_2$ шамалары айнымалы болып табылады, ал қалған шамалар (соның ішінде, өрістің айналмалы жиілігі) машинаның конструктивті шамаларымен анықталады, және де бұл шамаларды C коэффициентінде жинауға болады. Сонымен,

$$M = C \Phi I'_{2s} \cos \psi_2. \quad (9.29)$$

Жазылған (9.29) өрнегі электрмагнит қуаты ауа саңылауы арқылы машинаның айналмалы бөлігіне (тұрақты ток қозғалтқышындағы айналмалы бөлік болып зәкір табылады) берілетін, тұрақты ток қозғалтқышының электрмагнит иінкүшінің өрнегіне ұқсас (3.10).

Механикалық сипаттаманы талдау. Асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы — бұл M электрмагнит иінкүшінің n_2 роторының айналмалы жиілігіне тәуелді болуы (3.3 бөлімін қараңыз.). Өрістің айналмалы жиілігінің орнына, дәлел ретінде, көп жағдайларда, (9.2) өрнегінің жиілігіне байланысты, s сырғуын таңдайды, оны түрлендіру оңай

$$s = 1 - \frac{n_2}{n_1}. \quad (9.30)$$

Алдымен екі маңызды деректі белгілеп өтейік.

1. Алдында статордың Φ магнит ағыны асинхронды қозғалтқыштың жүктемесіне байланысты болмайтындығын және оның U_1 жеткізу кернеуіне пропорционалды (9.3 бөлімін қараңыз.) болатынын айтқан болатынбыз. Екінші жағынан, I'_{2s} ротор тогы жеткізу кернеуіне пропорционалды болады, оны (9.23) өрнегінен $E'_2 = E_1$ тендеуін және $E_1 \approx U_1$ болжалды теңдігін есепке ала отырып, байқауға болады. Мұндай жағдайда, (9.29) өрнегіне сәйкес, M электрмагнит иінкүші U_1^2 кернеуінің шаршысына пропорционалды болады.

2. Егер, жеткізу кернеуі өзгермесе, онда, (9.29) өрнегінен байқағандай, электрмагнит иінкүші ротор тогының белсенді құраушысы болатын $I'_{2s} \cos \psi_2$ көбейтіндісіне пропорционалды болады. Элек-

трмагнит иінкүшінің сырғуға тәуелді болуын талдау үшін сырғудан I'_{2s} және $\cos\psi_2$ шамаларының тәуелді болуын қарастырамыз. (9.10) және (9.11) өрнектерін қайта жазамыз:

$$I_{2s} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + sX_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}.$$

Байқағанымыздай, нөлге тең сырғу кезінде (ротор статор өрісімен, синхронды түрде айналған кезде), ротор тогы нөлге тең болады; онда электрмагнит иінкүші (9-29) формуласына сәйкес, нөлге тең болады. Сырғу артқан кезде, ротор тогы да артады.

Ротор тогы мен роторда ықпалдандырылатын ЭҚК арасындағы фазалардың жылжу бұрышының косинусын 9.5 а - суретінің негізінде анықтаймыз:

$$\cos\psi_2 = \frac{\frac{R_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}. \quad (9.31)$$

Осылайша, нөлге тең сырғу кезінде, $\cos\psi_2$ бірге тең болады. Сырғу артқан кезде, $\cos\psi_2$ төмендейді. Бірден көп сырғу кезінде, $\cos\psi_2$ төмендеуін жалғастырады. Сырғудың шексіздікке бағытталған жағдайын математикалық тұрғыдан қарастыруға болады; сонымен қатар, $\cos\psi_2$ нөлге бағытталады (шексіздік соңғы өрнектің екінші бөлгішінде көрсетілген). $\cos\psi_2$ (9.29) формуласына сәйкес төмендеуі, сондай-ақ, электрмагнит иінкүшіне төмендеу тарапынан әсер етеді және де шектегі M иінкүші $\cos\psi_2$ бірге нөлге бағытталады.

n_2 ротордың айналмалы жиілігі ((9.2) немесе (9.30) форм.кар.) теріс мәнге ие болған жағдайда, сырғу бірден жоғары мәнге ие болатынын түсіндіре кетейік. Бұл статор орамасы үш фазалы желіге қосылған қандай да бір екі сымның орнын ауыстыра отырып, қозғалтқыштың жұмыс үдерісіндегі статор орамасы фазаларының жүру режимін өзгертсек қана орын алады. Статор өрісінің айналмалы бағыты қарама-қарсы тұсқа өзгереді, және роторға тежелу сәті әрекет етеді. Осылайша, кері қосылумен тежелу әдісі іске асады (9.9 – бөлімін қараңыз). Әрине, егер, ротор тыныштықта болған кезде ($s = 1$), статор орамасы фазаларының жүру режимін өзгерсек, қозғалтқыш өрістің айналмалы бағытында қарқындай бастайды және сырғу бірден кем болады.

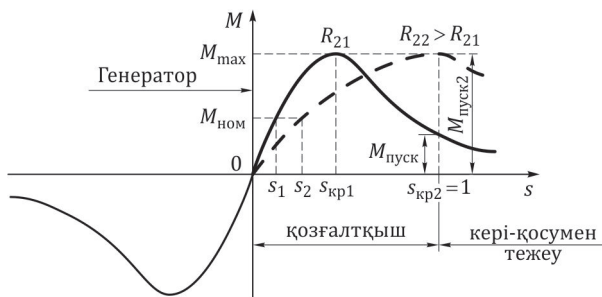
Осымен, алдында баяндалғанға сәйкес, электрмагниттік (айналды-

ру) иінкүш шексіздікке бағытталатын сырғу кезіндегідей, нөлге тең сырғу мәнін қабылдайды. Бұл сырғу нөлден артқан кезде, M кезеңі алдымен өседі, содан кейін $M_{\max}$ максималды мәніне жетіп, соңынан қайтадан азаятындығын білдіреді. Басқа сөзбен айтқанда, кезеңі ең жоғары болатын, сырғу мәндерінің нөлден бастап $s_{\text{кр}}$ сыни мәтіндері аралығында, кезеңнің өзгеру сипаты I_{2s} ротор тогының артуымен анықталады (сонымен қатар, $\cos\psi_2$ бірге жақын болады және баяу өзгереді). Керісінше, яр сыни мәнінен асатын жоғары сырғулар кезінде, кезеңнің өзгеруі $\cos\psi_2$ төмендеуімен анықталады: сонымен бірге, f_2 ротор тогының жиілігі айтарлықтай жоғары болады, ротор тогы үлкен реактивті құрушыға ие (айналдыру кезінің токтың актив құраушысымен анықталатындығын еске саламыз).

Бейнеленген сырғудың өзгеруі кезіндегі электрмагниттік иінкүштің өзгеру сипаты 9.6 суретінде көрсетілген, ол жерде ротор тізбегінің белсенді кедергісінің екі әртүрлі мәндері кезіндегі, асинхронды қозғалтқыштың екі механикалық сипаттамасы көрсетілген (кезеңнің белсенді кедергіден тәуелді болуы әрі қарай талқыланады). Ротордың айналмалы статор өрісінің айналмалы жиілігінен асқан кезде, теріс сырғу аумағы асинхронды қозғалтқыштың генераторлық режиміне сәйкес болады және 9.9 бөлімде қарастырылады.

Электрмагниттік иінкүш, тоқтап тұрған ротор кезінде, яғни, нөлге тең болатын сырғу кезінде, іске қосу $M_{\text{пуск}}$ кезі болып табылады.

$M_{\text{ном}}$ номиналды кезіне сәйкес болатын нүктелер, механикалық сипаттамалардың өрлеу аумақтарында белгіленген — қозғалтқыштың тұрақты жұмысының ауданында (тұрақты ток машинасын мысалға келтіре отырып жасалған қозғалтқыш жұмысының тұрақты бұлу мәселесі 3.3 бөлімде түсіндірілген;



9.6.-сурет. Ротор тізбегінің әртүрлі кедергісі кезіндегі, асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары.

Асинхронды қозғалтқышқа қатысты ол жерде келтірілген пікірлерді пайдалана отырып, кезеңнің сырғуға тәуелді болуының өрлеу аумағына кезеңнің ротордың айналмалы жиілігіне тәуелді болу төмендеу ауданынының сәйкес болатындығын ескеру керек).

Іске қосу иінкүшінің $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ номиналдыға қатысы, әдетте, 0,8...5 құрайды және *іске қосу иінкүшінің еселігі* деп аталады.

Максималды иінкүштің $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$ номиналдыға қатысы, әдетте, 1,6...2,5 ширегінде орналасады (арнайы қызмет қозғалтқыштарында 2,5...3,0) және *қозғалтқыштың асқын жүктемелік* қабілеті деп аталады.

Электрмагнит иінкүшінің ротор тізбегінің белсенді кедергісіне тәуелді болуы. M_{max} максималды иінкүшінің өрнегін иінкүштің сырғуға тәуелді болу қызметін, яғни, I'_{2s} және $\cos\psi_2$ айнымалы шамаларын сырғу арқылы белгілеу керек болатын, (9.29) қызметін зерттеу арқылы алуға болады. Функцияны зерттеу кезінде келесі белгілі болды:

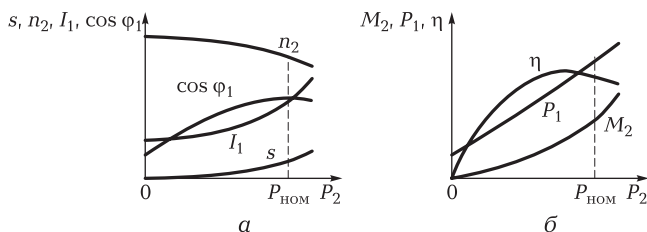
- $M(s)$ қызметінің M_{max} максималды мәні ротор тізбегінің белсенді кедергісіне байланысты болмайды;
- Ротор тізбегінің белсенді кедергісін арттырған кезде, электрмагниттік иінкүш сырғудың ең жоғары мәні кезінде, өзінің ең жоғары мәніне ие болады.

Бұл екі дерек те 9.6 - суретінде көрсетілген. Ол жерде байқағанымыздай, ротор тізбегінің белсенді кедергісін арттырған кезде, іске қосу кезі артады және белсенді кедергіні тиісті түрде таңдаған кезде, іске қосу кезі ең жоғары мәнге тең болады. Белсенді кедергіні басқару сұрақтары 9.8 - бөлімде талқыланады.

9.6. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС СИПАТТАМАЛАРЫ

Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары — бұл біліктегі P_2 пайдалы қуатына әр түрлі шамалардың тәуелді болуы: n_2 ротордың айналмалы жиілігінің; s сырғудың; M электрмагниттік иінкүштің немесе M_2 пайдалы иінкүшінің; I_1 статор орамасы тоғының; P_1 тұтынылатын қуаттылықтың; $\cos\varphi_1$ қуаттылық коэффициентінің; η пайдалы коэффициентінің. Сипаттамаларды тәжірибе түрінде *қозғалтқыштың табиғи жағдайда жұмыс істеу кезінде* алады: реттелмейтін қозғалтқыш, U_1 жеткізу кернеуі және f_1 кернеуінің жиілігі өзгермейтін шамаларға ие.

Жұмыс сипаттамалары 9.7 - суретінде көрсетілген. Көп сұлбалардың бір бірімен қиылысуын болдырмас үшін, сипаттамалар жеке координатты жазықтықтарда көрсетілген екі топқа бөлінген (9.7, а, б суретті



9.7.-сурет. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары.

қараңыз.).

n_2 ротордың айналмалы жиілігі біліктегі жүктеме артқан кезде азаяды (яғни, P_2 қуаты артқан кезде). Жүктеменің нөлден номиналдыға дейінгі аралығындағы азаюы, көбінесе, 5 % шегінде болады (3.4, б суретінде көрсетілген, параллельді қоздырудың тұрақты тогы қозғалтқышындағыдай қатаң сипаттама).

Қозғалтқыш білігіндегі жүктеме артқан кезде, s сырғу, айналмалы жиілігінің төмендеуі салдарынан артады. Сырғудың айналмалы жиілігіне тәуелді болуы (9.2) формуласымен беріледі. (8.4) есепке ала отырып, айналмалы жиілігі, сырғу, жеткізу кернеуінің жиілігі және машина полюстері жұптарының сандары арасындағы байланысты көрсететін, тағы да бір пайдалы өрнекке қол жеткізуге болады:

$$n_2 = \frac{60f_1(1-s)}{p}. \quad (9.32)$$

M_2 білігіндегі тежелу (пайдалы) сәті (9.28) формуласына ұқсас өрнектеледі:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2} = \frac{P_2}{2\pi f_{вр}} = \frac{30P_2}{\pi n_2}, \quad (9.33)$$

Бұл жердегі Ω_2 — ротор айналуымен бұрыштық жылдамдығы, рад/с; $f_{вр}$ — ротордың айналмалы жиілігі, об/с (n_2 айн/мин) есепке алынған $= 60f_{вр}$).

P_2 жүктемесінің артуымен n_2 айналмалы жиілігін шамалап төмендету есебінен M_2 тежелу (пайдалы) тежелу сәтінің артуы біліктегі пайдалы қуаттылықтың артуына қарағанда, тезірек болады, және тежелу сәтінің қисығы тік сызықтан жоғары қарай шамалы ауытқиды (тұрақты ток қозғалтқышының пайдалы сәтінің қисығымен салыстырыңыз, 3.4, б суретті қараңыз.).

Қозғалтқыштың механикалық шығындарынан арылуға бағытталатын, M_2 пайдалы иінкүші мен M_0 бос жүріс иінкүшінің сомасы

стационарлық жұмысы кезінде (үдеу болмаған жағдайда) қозғалтқышпен үдетілетін, *M* айналдыру (электрмагниттік) кезіне тең:

$$M = M_2 + M_0 \quad (9.34)$$

Қозғалтқышпен желіден тұтынылатын I_1 тогы біліктегі жүктеме артқан кезде, қозғалтқышпен желіден тұтынылатын II тогы біркелкі өзгермейді. Шамалы жүктеме кезінде ток баяу артады, ал аса көп жүктеме артылғанда – статор мен ротордың орамаларындағы белсенді шығындардың орнын толтыра отырып, шұғыл артады.

Қозғалтқыш білігіндегі жүктеме өзгерген кездегі $\cos\varphi_1$ қуаттылық коэффициентінің өзгеруі келесі түрде іске асады. Бос жүру кезінде ($s \approx 0$ кезінде) $\cos\varphi_1$ аз болады, себебі, машинадағы шығындарды өтеуге жіберілетін статор тогының актив құраушысы магнит ағынын жасайтын, бұл токтың реактивті құраушысымен салыстырғанда аз болады. Біліктегі жүктеме артқан кезде, статор тогының актив құраушысының өсуінің есебінен, қуаттылық коэффициенті ең жоғары мәнге дейін жете отырып 0,8...0,9), артады. Аса үлкен жүктемелер кезінде, сырғу мен ротор тогының жиілігі әжептәуір өседі. Осы себептен, ротор орамасының реактивті кедергісі артады және $\cos\varphi_1$ біршама азаяды.

P_1 тұтынылатын қуат (9.25) өрнегімен анықталады. Тұрақты жеткізу кернеуі кезінде, ол тек $I_1 \cos\varphi_1$ статор тогының актив құраушысына ғана тәуелді болады. Жеке-жеке алынған I_1 және $\cos\varphi_1$ шамалары P_2 пайда қуаты өзгерген кезінде, біркелкі өзгермейді. Бұл шамалардың көбейтіндісі, P_1 тұтынылатын қуат сияқты, пайда қуатына шамамен сызықтық тәуелді болады. P_1 қисығының жоғары қарай біршама ауытқуы жүктеменің артуына байланысты, статор мен ротор орамаларының мысындағы шығындардың артуымен түсіндіріледі.

ПӘК, кез келген электр машинасы немесе трансформатордағыдай, пайда қуатына тәуелді болады. Бос жүріс кезінде (пайдалы жүктеме болмаған кезде) ПӘК бірге тең болады. Тұрақты шығындар ауыспалы шығындарға тең болатын жүктеме кезінде, ПӘК аса үлкен мәнге ие болады (5.4-бөлімін қараңыз).

9.7. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ІСКЕ ҚОСУ

Қысқа тұйықталған қозғалтқышты тікелей желіге қоса отырып, іске қосу. Іске қосудың осы әдісі кеңінен қолданылады. Іске қосу

кезінде ротор қоғалыссыз болады, және де статор магнит өрісінің күш желісі ротор орамаларының өткізгіштерін аса жоғары жиілікпен қиып өтеді. Осы себептен, ротор орамасында үлкен мәнге ие ЭҚК жүргізіледі, және де оның бойымен, сондай-ақ, статор орамасының бойымен номиналдан 5-7 есеге артық болатын ток жүреді. Үлкен іске қосу тогы желідегі кернеуді азайтады, бұл басқа да энергия қабылдаушыларының жұмысына өз әсерін тигізеді. Іске қосу тогы желідегі кернеудің 10...15 % артық төмендеуін тудырмайтын кезде, іске қосудың бұл тәсілін қолдануға болады. Заманауи энергия жүйелері көп жағдайларда, асинхронды қозғалтқыштарды іске қосуға мүмкін болатын қуаттылықтарға ие. Қазіргі кезде, қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштарды келесіні есепке ала отырып, орамалардың қызу шарттары бойынша және орамаларға әрекет ететін электрдинамикалық күштерді іске қосу кезінде пайда болатын шама бойынша тікелей іске қосуға болатындай етіп жобалайды. Қуаты мыңдаған киловатт болатын қозғалтқыштарды осындай тәсілмен жиі іске қосады.

Қозғалтқыш үдеген кезде, сырғу бірден бастап нөлге жақын мәнге дейін төмендейді. Сонымен бірге, (9.11) тендеуіне сәйкес ротор тогы мен (9.19) тендеуіне сәйкес статор тогы төмендейді.

Үлкен іске қосу тогынан басқа, тікелей қосу арқылы іске қосудың өзге де кемшілігі бар — шағын іске қосу кезі. Расымен, жылжымайтын ротор жағдайында, оның орамасында ЭҚК ықпалдандырылады, оның жиілігі желі тогының жиілігіне тең; демек, іске қосу кезіндегі ротор орамасының индуктивті кедергісі жоғары. Сондықтан, айналдыру кезін анықтайтын, ротор тогының актив құраушысы шағын болады ((9.29) теңдігін қараңыз). Осылайша, қарапайым жасалған қозғалтқышты тікелей желіге қосу арқылы іске қосу, білікте жүктеме болмаған жағдайда, немесе аз жүктеме кезінде іске асырылады.

Қысқа тұйықталған қозғалтқыштың статор орамасын жұлдыздан үшбұрышқа ауыстыру. Кернеу төмен болған кезде, іске қосудың бір тәсілі ретінде қолданылады. Статордың орамасына *төмендетілген кернеу* берілетін іске қосудың барлық тәсілдері, іске қосу тогын біраз төмендетуге мүмкіндік береді, бірақ, сонымен қатар, іске қосу кезі де төмендейді.

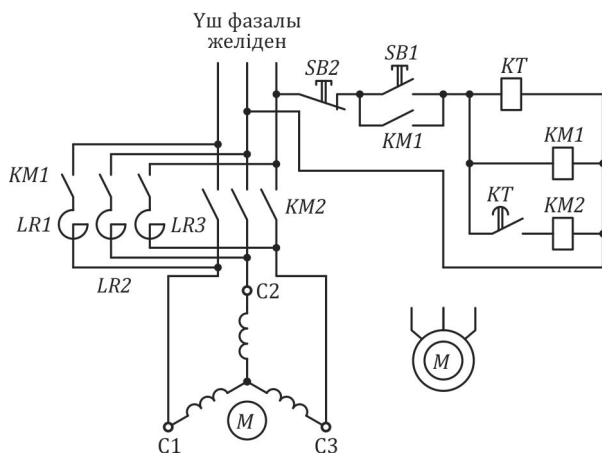
Жұлдыздан үшбұрышқа ауыстыру, статор орамасын үшбұрышқа қосу керек болғанда, яғни, статор орамасының әр фазасы желінің жазықтық кернеуіне есептелген қозғалтқыш жұмысы кезінде ғана қолдануға болады. Осы жағдайда, іске қосу кезінде, статор орамасын жұлдыз ретінде байланыстырады, ал үдегеннен кейін — үшбұрыш

ретінде; бұған қоса ол жалғастырғыштармен емес, 9.4, б, в - суретінде көрсетілген ток аударғышпен жүзеге асырылады. Статор орамасы жұлдыз болып жалғанған кезде, фазалық кернеулер мен ток үшбұрыш болып жалғанған кезге қарағанда, $\sqrt{3}$ есе төмен болады. Сонда іске қосу тогы (жазықтық) орамаларды жұлдыз ретінде байланыстыру кезінде үшбұрыш ретінде байланыстырғанға қарағанда, 3 есе аз болады.

Келесі пікірді түсіндірейік. Статор орамасын жұлдыз ретінде байланыстырған кезде, орама фазасындағы кернеу желінің желілік кернеуінен $\sqrt{3}$ есе аз болады. Орама фазасындағы ток осы кернеуге пропорционалды болады, ал желілік сымдардағы ток (желілік ток) фазалық токқа (оның мәні 10 А болсын) тең. Ораманы үшбұрыш ретінде байланыстырған кезде, орама фазасындағы кернеу желілік кернеуге тең болады, және орама фазасындағы ток осы кернеуге пропорционалды (біздің мысалымызда бұл ток 17,3 А тең). Мұндай байланыс кезінде, желілік ток фазалықтан (30 А) $\sqrt{3}$ есе көп.

Іске қосу кезі фазалық кернеудің шаршысына пропорционалды (9.5 бөлімін қараңыз.) және де сонымен қатар, жұлдыз ретінде байланыстырған кезде, үшбұрыш ретінде байланыстырғанға қарағанда, 3 есе кем болады.

Қысқа тұйықталған қозғалтқышты реакторлар арқылы желіге қосу. Бұл төмендетілген кернеу кезінде іске қосудың басқа тәсілі. *Реакторлар* — үлкен индуктивті кедергіге ие және қысқа тұйықталған токтарды электр желілерінде шектеу үшін, сондай-ақ, тиристорлық



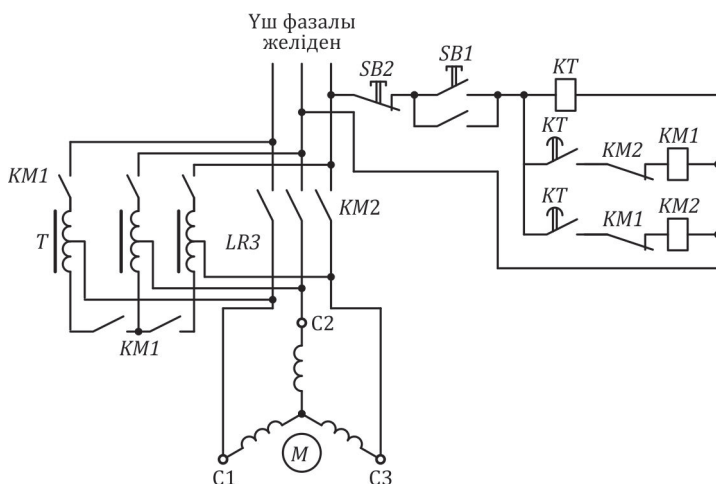
9.8.-сурет. Асинхронды қозғалтқышты реакторлардың көмегімен іске қосу сұлбасы.

түрленгіштердің сұлбаларында индуктивті балластық кедергі ретінде пайдаланылатын құрылғылар. Реакторларды пайдалана отырып, автоматты түрде іске қосу сұлбасы 9.8 суретінде көрсетілген.

Сұлбада тікбұрыш ретінде *KM* түйістіргіштерінің шарғылары мен *KT* уақыт релесінің шарғылары көрсетілген. Шарғылардың бойымен ток жүрген кезде іске қосылатын түйіспелердің шарғыларындай әріптік-сандық белгілері бар. *SB1* және *SB2* — тұйықтайтын және ажырататын батырмалар. *KT* уақыт релесінің түйіспелері іске қосылған кезде (мұны осындай түйіспелердің белгіленуіндегі доғал көрсетеді), бәсеңдетілген түйіспелер болып табылады. *LR* таңбасымен реакторлар белгіленген. М әріппен қысқа тұйықталған асинхронды қозғалтқыш белгіленген, оның статорында *C1*, *C2*, *C3* түйіндері бар. Төменде оң жағында электр сұлбаларында асинхронды қозғалтқышты бейнелеудің басқа тәсілі көрсетілген.

Қарастырылған сұлба келесі түрде әрекет етеді. *SB1* батырмасын басқан кезде, желіден пайда болатын ток *KT* уақыты релесінің шарғысы бойымен, сондай-ақ, *KM1* түйістіргіш шарғысының бойымен жүреді. *KM1* түйістіргіш шарғысының зәкірі (қозғалатын бөлік) қозғалатын түйіспелер бекітілген осьті айналдыра отырып, шарғының өзегіне қарай тартылады. *SB1* батырмасын тұйықтайтын *KM1* түйістіргіші блок-түйіспесінің, сондай-ақ, реакторлардың тізбелерін тұйықтайтын, *KM1* түйістіргіш күштік түйіспелерінің тұйықталуы іске асады. Нәтижесінде, желі кернеуімен салыстырғанда, реакторлардың тізбектерінде болудың әсерінен, қозғалтқыш статорына төмендетілген кернеу беріледі. Қозғалтқыш үдей түседі. *KT* уақыт релесінің тағайындамасымен белгіленген, шамалы уақыт өткеннен кейін *KT* түйіспелерінің тұйықталуы іске асады, және *KM2* түйістіргіш шарғысының бойымен ток жүре бастайды. Сонымен бірге, реакторларды тұйықтайтын, *KM* түйістіргішінің күштік түйіспелері тұйықталады және де қозғалтқыш желінің толық кернеуінде болады. *SB2* ажыратқыш батырмасын басқан кезде, ток түйістіргіш шарғыларының бойымен жүруді тоқтатады және түйіспелер ажырайды.

Қысқа тұйықталған қозғалтқышты автотрансформатор арқылы желіге қосу. 9.9 суретінде көрсетілген сұлба бойынша жүзеге асыруға болады. *SB1* батырмасын басқан кезде, ток *KT* уақыт релесі шарғысының бойымен және *KM1* түйістіргіш шарғысының бойымен жүреді. *KM1* түйістіргішінің күштік түйіспелері қозғалтқышты *T* трансформатор арқылы қосады. Белігілі уақыт өткеннен кейін, *KT* релесінің ажыртқыш түйіспелері ажырап, ал тұйықтайтындары тұйықталады. Сонымен қатар, *KM1* түйістіргішінің шарғысы токсыздандырылады, және де автотрансформатор сөнеді. *KM2* түйістіргішінің шарғысы бойымен, бір мезгілде ток жүре бастайды және де *KM2* түйістіргішінің күштік



9.9.-сурет. Асинхронды қозғалтқышты автотрансформатордың көмегімен іске қосу сұлбасы.

түйіспелері қозғалтқышты желінің толық кернеуіне қосады.

KM2 түйістіргішінің шарғысы бойынша ток жүрмеген кезде, *KM1* түйістіргішінің шарғысымен байланыстырылған, *KM2* түйістіргішінің ажыратқыш түйіспелері тұйық жағдайда болады.

Бастапқы үдеуден кейін, автотрансформатордың орамасын жұлдыз ретінде байланыстыратын түйіспелер ажыратылған жағдайда (бұл жағдайда, автотрансформатордың тізбегіндегі жоғарғы және төменгі түйіспелер әр түрлі түйістіргіштерге тиесілі болады), екі сатылы автотрансформаторлық іске қосу пайдаланылады. Төменгі түйіспелер ажыратылған кезде, автотрансформатор реакторға айналады; статор орамасының жеткізу кернеуі артады, бірақ, номиналдан төменгі қалыпта болады. Іске қосудың екінші сатысында қозғалтқыш желінің толық кернеуіне қосылады.

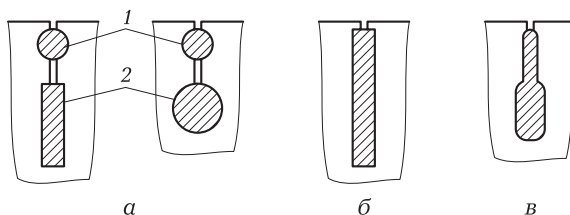
Жетілдірілген іске қосу қасиеті бар қысқа тұйықталған қозғалтқыштар. Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштардың іске қосылу кезін арттыру үшін ротордың қосарланған орамасын (қосарланған «белічья клетка»), сондай-ақ, терең саңылаулары бар роторды пайдаланады.

Қысқа тұйықталған ротордың қосарланған орамасы 2 ішкі және сыртқы 1 орамадан тұрады (9.10, а - сурет). Қозғалтқышты желіге қосқан кезде, ротор қозғалыссыз болады және де ротор тогының жиілігі желі тогының жиілігіне тең болады: $f_2 = f_1$. Орама-

лардағы ток өздерінің толық кедергілеріне кері пропорционалды түрде тарайды. Ішкі орама ротор денесіне терең батырылған және сыртқы орамаға қарағанда, сейілу саңылауы магнит ағынының көп күш желісімен тіркескен. Сонда, токтың аса жоғары жиілігі кезінде, ішкі ораманың индуктивті кедергісі ұлғаяды, соның есебінен, оның толық кедергісі сыртқы ораманың толық кедергісін біраз арттырады. Сондықтан, *іске қосу кезінде, ток көп жағдайларда, сыртқы орамада жүреді*. Сыртқы орама өзектерінің қимасы ішкі өзектердің қимасына қарағанда, біршама кішірек болып жасалғандықтан, біріншілердің белсенді кедергісі екіншілердің белсенді кедергісінен біраз артық болады. Бұдан басқа, жоғары ораманың өзектерін, көбінесе, жезден немесе қоладан жасайды — мыс пен алюминийге қарағанда, жоғары меншікті кедергіге ие материалдардан жасайды.

Сонымен, бір жағынан, ішкі өзектердің толық кедергісінің жоғары болуынан, іске қосу кезінде, ток көп жағдайларда сыртқы өзектердің бойымен жүреді. Екінші жағынан, сыртқы өзектер үлкен белсенді кедергіге ие, және осы себептен қозғалтқыштың максималды кезі үлкен сырғу аумақтарына қарай жылжиды; сонымен бірге, *қарапайым жасалған қозғалтқыштарға қарағанда, іске қосу кезі біраз артады* (ротор тізбегінің жоғары кедергісі кезіндегі қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы штрих сызықтарымен белгіленген 9.6 суретін қараңыз). Сыртқы ораманы іске қосушы деп атайды.

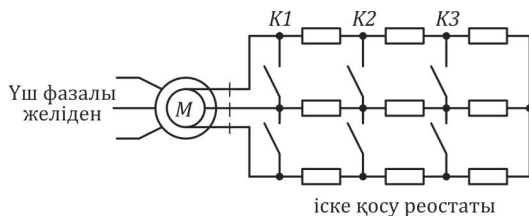
Жұмыс режимінде сырғу аз болады, және де ротордағы ток жиілігі нөлге жақын болады ($f_2 \approx sf_1 \approx 0$, (9.7) формуласын қараңыз). Сондықтан, ротордың екі орамасының да индуктивті кедергілері азаяды және де ток арасындағы ток өздерінің белсенді кедергілеріне кері пропорционалды түрде тарайды. Осылайша, *іске қосылғаннан кейін ток, көбінесе, ротордың ішкі орамасының бойымен жүреді*, ол жұ-



9.10.-сурет. Жақсартылған қасиеттері бар қысқа тұйықталған роторлардың өзектері:

a — қосарланған ораманың өзектері: *1* — сыртқы (іске қосу) ораманың өзектері; *2* — ішкі (жұмыс) ораманың өзектері; *б* — терең саңылаулары бар ротордың өзегі; *в* — бөтелке үлгісіндегі өзек

9.11.-сурет. Іске қосу реостаты бар қозғалтқыш.



мыс орамасы деп аталады.

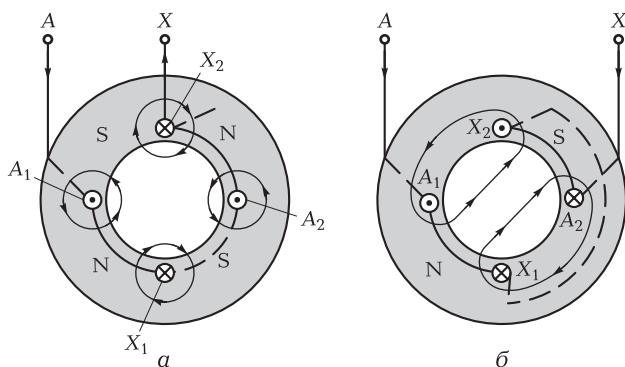
Терең саңылаулары бар ротордың әрекет етуі ұқсас түсіндіріледі (9.10, б сурет). Іске қосу кезінде, ток өзектің сыртқы бөлігіне қарай ығыстырылады, себебі, төменгі жағы үлкен индуктивті кедергіге ие, ал жұмыс кезінде, өзектің барлық қимасы біркелкі қолданылады.

Бөтелке үлгісіндегі өзектердің қолданылуы (9.10, в -сурет) терең саңылауы бар роторға қарағанда, саңылаулардың биіктігін азайтуға мүмкіндік береді және осының есебінен, ротордың диаметрін кішірейтуге де мүмкіндік береді.

Фазалық роторы бар асинхронды қозғалтқыштарды іске қосу. Фазалық ротор тізбегінің ротор орамасына қатысты белсенді кедергісін арттыру үшін сакина - щеткалар түйіспелері арқылы іске қосу реостатын қосады (9.11 сурет). Іске қосу кезінде, $K1$, $K2$, $K3$ түйістіргіштерінің түйіспелері ажыратылған қалыпта болады, бұл ротор тізбегінің жоғарғы кедергісімен және іске қосу кезімен қамтамасыз етеді (9.6 суретті қараңыз.). Қозғалтқыштың үдеу шамасына қарай, $K3$, $K2$ және $K1$ түйістіргіштерінің түйіспелері кезекпен кезек тұйықталады (автоматтық басқару тізбегі 9.11 - суретінде көрсетілмеген). $K1$ түйістіргішінің түйіспелері тұйықталғаннан кейін, іске қосу реостатының барлық сатылары тұйықталып тұрады және де ротордың орамасы қысқаша тұйықталып тұрады; қозғалтқыш айналмалы номиналды жиілігіне дейін үдейді және осы жерден іске қосу үдерісі аяқталады. Фазалық роторы бар қозғалтқыштар іске қосудың ең жақсы қасиеттеріне ие, себебі, іске қосу реостатын қосу мүмкіндігі екі тапсырманы шешеді: іске қосу тоғын азайту және іске қосу кезеңін арттыру. Іске қосу реостаттары тек қана іске қосу кезіндегі қысқа мерзімді жұмысқа ғана есептелінген.

9.8. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ РОТОРЫНЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ЖИІЛІГІН РЕТТЕУ

Асинхронды қозғалтқыштың n_1 роторының жиілігі (9.32) фор-



9.12.-сурет. Статор орамасының бір фазасын полюстердің әртүрлі сандарына қосу сұлбалары:

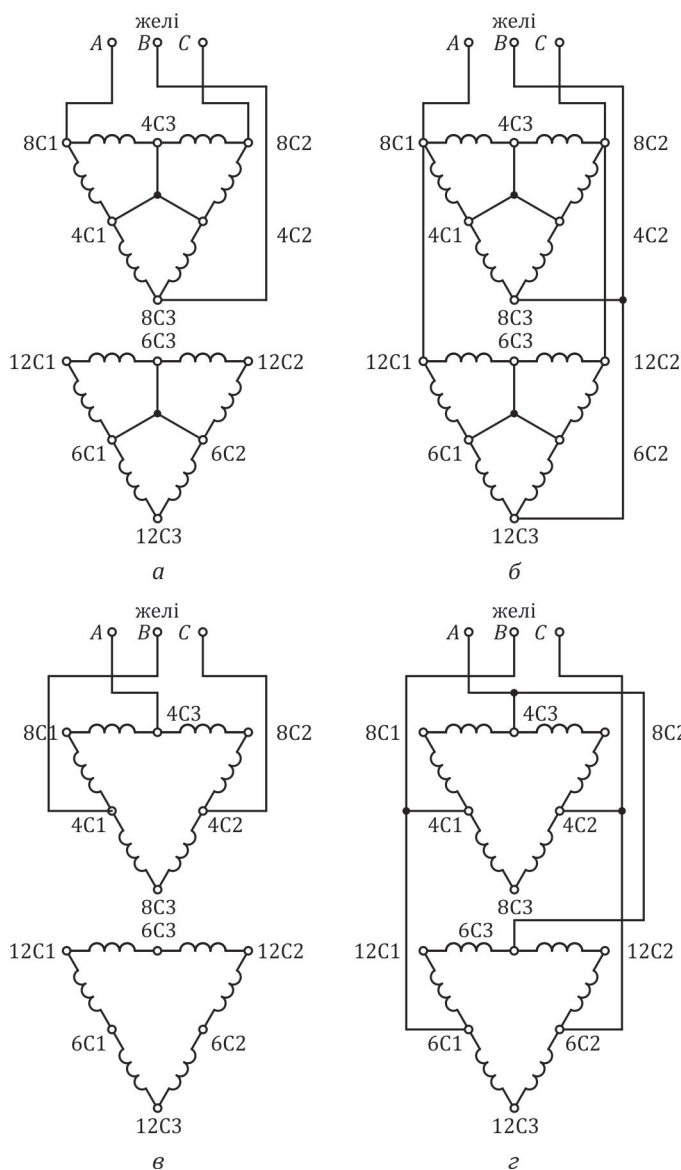
a — төрт полюс ($p = 2$); $б$ — екі полюс ($p = 1$)

муласына сәйкес, p орамасының полюстары жұптарының санына, p статорына, s роторының сырғуына және қозғалтқышты қуат беретін f_1 үш фазалық кернеудің жиілігіне тәуелді болады. Айтылған параметрлердің біреуіне әрекет ете отырып, айналмалы жиілігін реттеуге болады.

Полюстар жұптарының сандарын өзгертумен, айналмалы жиіліктерін реттеу. Статорда полюстердің әртүрлі санымен магнит өрісін жасайтын бірнеше орамаларды жасаумен, немесе полюстердің әртүрлі сандарына ауыстыруға болатын бір ораманы жасаумен іске асырады. Сондай-ақ, әрқайсысын полюстердің әртүрлі санына қоюға мүмкіндік беретін, екі орама жасалуы мүмкін.

Статор орамасының бір фазасының мысалы 9.12 a , $б$ - суретінде көрсетілген, ол полюстердің бір және екі жұбына қосыла алады. (Ораманың үш фазасының болуы полюстердің санын арттырмайды, ол өрістің айналуын қамтамасыз етеді.) Штрих сызықтарымен статордың сыртқы шетжағымен жүретін алдыңғы байланыстар көрсетілген. Нұсқарлары бар жұқа тұйықталған сызықтармен магнит өрісінің күш сызықтары бейнеленген. Күш сызықтарының бағыттары статор орамаларының белсенді сымдарындағы токтардың бағыттарына сәйкес, бұрғы ережесі бойынша анықталған.

Үш жылдамдықты қозғалтқыштың орамаларын байланыстыру мысалы 9.13- суретінде көрсетілген. Статорда екі үш фазалық орама орналастырылған. Әр ораманың фазалары өзара үшбұрыш ретінде байланысқан. Әр фаза екі шарғыға бөлінген. Тек қана бір желі қол-



9.13.-сурет. Төрт жылдамдықты қозғалтқыш орамаларын байланыстыру сұлбасы:

a — 8 полюстер ($p = 4$); $б$ — 12 полюстер ($p = 6$); $в$ — 4 полюстер ($p = 2$); $г$ — 6 полюстер ($p = 3$).

данылған 9.13 а -суретіндегі сұлба бойынша байланыс полюстердің төрт жұбын қамтамасыз етеді.

(8.4) формуласына сәйкес, қуат беру кернеуінің жиілігі 50 Гц болған кезде, бұл жағдайда, статор өрісінің айналмалы жиілігі 750 айн/мин құрайды. Қозғалтқыштың техникалық паспортына сәйкес, ротордың айналмалы номиналды жиілігі 705 айн/мин құрайды. 9.13, б - суретіне сәйкес жасалған байланыс полюстердің алты жұбын береді. Сонымен бірге, $n_1 = 500$ айн/мин; $n_{2ном} = 460$ айн./мин. 9.13, в және г суретінде екі және үш полюстері жұптарының сандары қамтамасыз етілетін байланыстар көрсетілген, тиісінше; ротор өрісінің айналмалы жылдамдықтары 1 500 және 1 000 айн./мин; ротордың айналмалы номиналды жылдамдықтары 1 410 және 910 айн./мин.

Айналмалы жиілігін реттеудің сипатталған тәсілі үнемді болып табылады, бірақ, оның кемшілігі – реттеу сатылы болады. Бұдан басқа, бұл тәсілді *тек қысқа тұйықталған қозғалтқыштарға қатысты* ғана пайдалануға болады. Статор полюстері сандарын өзгерткен кезде, фазалық роторы бар қозғалтқыштарда ротор орамасын да полюстердің сол сандарына қосу қажет болатын еді, бұл конструктивті жағынан өте қиын болады және көп жылдамдықты қозғалтқыштардың құны мен габариттерін арттыратын еді.

Сырғуды өзгертумен, айналмалы жиілігін реттеу тәсілдері. Ротор тізбегінің белсенді кедергісін, статордың жеткізу кернеуін, қуат беретін үш фазалық кернеудің симметриясын өзгерту арқылы жүзеге асырылады.

Ротор тізбегінің белсенді кедергісін өзгерту фазалық роторы бар қозғалтқыштарда пайдаланылады. Осы мақсатта, ротордың орамасына щетка түйіспелері арқылы реттеуші реостат қосылады, ол іске қосу реостатына қарағанда (9.11 суретті қараңыз.), ұзақ жұмыс режиміне есептелген. Ротор тізбегінің белсенді өзгерту кезіндегі, қозғалтқыштың механикалық сипаттамаларының өзгеруі бейнеленген 9.6 суреттен байқағанымыздай, осы айналмалы кезінде (мысалы, номиналды) белсенді кедергі қаншалықты үлкен болса, сырғу соншалықты көп болады (айналмалы жиілігі де сол мөлшерде аз болады). Осылайша, реттеуші реостаттың кедергісін өзерткен кезде, қозғалтқыштың айналмалы жылдамдығы өзгереді. Айналмалы жиілігін реттеудің осы тәсілі үлкен қолданысқа ие, бірақ, ол үнемді емес, себебі, реттеуші реостатта энергия біраз шығынға ұшырайды.

Ескерту. Екі сипаттамада айналмалы кезінің бір мәніне сәйкес, нүктелердің орналасуын салыстыра отырып, біз,

қозғалтқыштың айналмалы жиілігінің өзгертуімен статикалық жүктемелік кезең өзгермейді деп болжаймыз ((3.15) теңдігін қараңыз). Мұндай болжау талдауды жеңілдету үшін жасалды, бірақ, көп жағдайларда, статикалық кезең шынымен өзгермейді (3.3 бөлімін қараңыз.)

Жеткізу кернеуін өзгертумен, айналмалы жиілігін реттеу — аса үнемді тәсіл, бірақ, жиілікті шағын шектерде ғана өзгертуге мүмкіндік береді (10...15 %). 9.14 суретінде статор орамасының әртүрлі жеткізу кернеулері кезінде алынған, асинхронды қозғалтқыштың екі механикалық сипаттамасы бейнеленген. Суреттен байқағанымыздай, бір айналдыру кезіне әртүрлі жеткізу кернеулері кезіндегі әртүрлі сырғуларға сәйкес болады. Реттеудің бұл тәсілі кернеудің номиналдық мәнге қатысты төмендетілуі кезінде ғана іске асырылады, себебі, номиналдық мәнді асыруға болмайды.

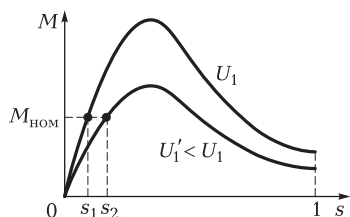
Жеткізу кернеуін іске қосу сұлбасына (9.9 –суретті қараңыз) ұқсас, статор тізбегінің желісіне қосылған, *реттеуші автотрансформатор* арқылы өзгертуге болады, бірақ, автотрансформаторды сөндірудің автоматикасын қолданусыз.

Кернеуді реттеу үшін үш фазалық қаныққан *дросселі* пайдаланады, оның жұмыс орамалары статордың тізбегіне қосылған, жұмыс орамаларымен электрлік түрде байланысты емес басқару орамалары тұрақты кернеудің реттелетін көзінен қуат беріледі. Басқару орамалары токтарының артуымен, дроссель өзектерінің магниттік қанығуы артады және де оның индуктивті кедергісі азаяды, соның есебінен, қозғалтқыштың жеткізу кернеуі өседі.

Аз габариттерге және аз массаға ие, кернеуді реттеудің аса жетілген құрылғысы *тиристорлық реттегіштердің* негізінде жасалады.

Жеткізу кернеуі симметриясын бұзумен, айналмалы жиілігін реттеу, сондай-ақ, сырғудың өзгеруіне әкеліп соғатын реттеу тәсілдеріне жатады.

9.14.-сурет. Жеткізу кернеуінің әртүрлі мәндері кезіндегі механикалық сипаттамалары.



Статор орамасының фазалары бойымен симметриялы түрде жүретін, токтардың симметриялық үш фазалы жүйесі айналмалы магнит өрісін тудырады, оның индукциясының векторы модуль бойынша өзгермейді (8.1 бөлімін қараңыз.). Мұндай магнит өрісі шеңберлі деп аталады. Егер, токтар жүйесі симметриялы болмаса, яғни, статор орамасын симметриялық емес үш фазалы кернеу қуат беретін болса, онда $\mathbf{B}$ векторы айналмалы кезінде модуль бойынша өзгереді және өріс *эллипстік өріске* айналады.

Эллипстік өрістің екі әркелкі шеңберлі құрастырушымен ұсынылуы математикалық түрде дәлелденген: тура өріске тура бағыттағы $\mathbf{B}_{\text{пр}}$ векторының айналуы сәйкес келеді, ал кері өріске кері бағыттағы, модуль бойынша кіші болатын, $\mathbf{B}_{\text{обр}}$ векторының айналуы сәйкес келеді. Қорытқы электрмагниттік иінкүш ($M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$) үш фазалы кернеудің бұзылмаған симметриясы кезінде машинада әрекет ететін электрмагниттік иінкүштен аз болады. Сонда, бір статикалық кезеңді өткеруге қажетті электрмагниттік иінкүшке әртүрлі сырғулар кезіндегі шеңберлі және эллипстік өріс жағдайында, әртүрлі кернеу кезіндегідей қол жеткізіледі (9.14 суретті қараңыз.).

Үш фазалы жеткізу кернеуінің симметриясының бұзылуын және осы бұзылудың дәрежесін реттеуді бір фазалы реттеуші автотрансформатордың статоры фазаларының біреуін тізбеге қосу арқылы қамтамасыз етуге болады. Айналмалы жиілігін реттеу аумағы өте тар болады, ал қозғалтқыштың ПӘК кернеудің симметриясыздығын арттырған кезде, төмендейді. Реттеудің бұл тәсіл, көбінесе, шағын қуатты қозғалтқыштарда пайдаланылады.

Айналмалы жиілігін импульстік реттеу орташа жеткізу кернеуін өзгерту тәсілдерінің бірі болып табылады. Тұрақты ток қозғалтқыштары үшін бұл тәсіл 3.6 - бөлімде көрсетілген. Орташа кернеу статор орамасын желіге жиі қосу және сөндіру есебінен, немесе байланыссыз құрылғы арқылы, мысалы, тиристорлық кілт арқылы өзгереді. Қозғалтқыш қуат көзін жиі үзіп тұру жағдайларында, үдеу және бәсеңдетілген тәртіпте жұмыс істейді. Айналмалы орташа жиілігі қосылған және сөнген жағдайлар уақыты аралығының қатынасына тәуелді болатын, орташа жеткізу кернеуімен анықталады.

Қуат берушы кернеу жиілігін өзгертумен, айналмалы жиілігін реттеу. Статор өрісінің айналмалы жиілігін өзгертуден негізделген ((8.4) – өрнекті қараңыз) және реттелетін жиілігі бар қуат көздерін пайдалану кезінде жүзеге асырылады. Мұндайлар электрмашина-

лық немесе жиілікті жартылай өткізетін түрлендіргіштер болып қызмет ете алады. Қуат берушы кернеудің жиілігін өзгерткен кезде, қозғалтқыштың максималды кезеңі де өзгереді, онымен қоса, $M_{\max}/M_{\text{ном}}$ асқын жүктемелік қабілет те өзгереді. Қозғалтқыштың жұмысы тұрақты болу үшін, яғни, кездейсоқ артық күштер қозғалтқыштың тоқтауына себеп болмас үшін асқын жүктемелік қабілетті реттеу үдерісінде сақтап қалу қажет. Сондықтан, жеткізу кернеуінің жиілігін өзгертумен қоса, бір уақытта, кернеудің мәнін де өзгерту қажет. Жиілік пен кернеуді бір уақытта өзгерту сипаты электр жетегінің қасиеттеріне тәуелді болады, яғни, айналмалы жиілігін өзгерту кезінде жүктемелік статикалық иінкүштің қаншалықты өзгергеніне тәуелді болады. Сонымен қатар, статикалық иінкүш өзгермеген жағдайда, *кернеу жиілікте пропорционалды түрде өзгеру қажет.*

9.9. ГЕНЕРАТОРЛЫҚ ТӘРТІП ЖӘНЕ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ТЕЖЕУ ТӘСІЛДЕРІ

Генераторлық режимдегі асинхронды машина. Рекуперациялық тежеу. Электр машиналарының қайтымдылық қасиетіне сәйкес, әр машина қозғалтқышты тәртіпте, сонымен бірге, генераторлық тәртіпте де жұмыс істей алады (3.1 бөлімін қараңыз.).

Асинхронды машинаның статор орамасы үш фазалы желіге қосулы болсын, ал оның білігі бастапқы қозғалтқыштың білігімен біріктірілсін (бу турбинасының, синхронды қозғалтқыштың және т.б.). Егер, бастапқы қозғалтқыш білікті асинхронды машина магнит өрісінің n_1 айналмалы жиілігінен артық болатын, n_2 жиілігіне дейін айналдырса, онда оның сырғуы кері болады ((9.2) және (9.30) өрнекті қараңыз.). Сонымен бірге, M электрмагниттік иінкүшті анықтайтын, $I'_{2s} \cos \psi_2$ ротор тогының актив құраушысы да кері болады ((9.29) өрнекті қараңыз.). Негізінде, ротор тогының белгісі (9.10) теңдеуіне сәйкес, сырғу белгісіне байланысты болады, ал $\cos \psi_2$ шамасы әрқашан оң болады ((9.31) өрнекті қараңыз.).

Сонымен, $n_2 > n_1$ шарты жағдайында, M электрмагниттік иінкүш теріс санмен белгіленеді (тежеу). Бұл машинаның механикалық қуатты өндірмейтіндігін (қозғалтқыш болып табылмайды), керісінше, оны тұтынатындығын білдіреді, яғни, механикалық қуатты үш фазалы желіге беретін электр қуатына айналдыратын генератор ретінде жұмыс істейді. Асинхронды генератордың ерекшелігі болып оны үш фазалы желіге қосу қажеттілігі табылады, соның әсерінен генератор

қозады, яғни, айналмалы магнит өрісін туындатады.

Генератор режиміндегі асинхронды машинаның механикалық сипаттамасы 9.6-суреттің сол жағында көрсетілген. Бұл тәртіпте ротордың сырғуы өзгеруі мүмкін, теорияда, $(0, -\infty)$ шегінде.

Желіден магнит өрісін тудыру үшін реактив қуаты тұтынылады. Бұл қуат аса үлкен: ол асинхронды генератордың толық қуатының 20 дан 50 % дейін құрайды. Осы себептен, асинхронды генераторларды электр қуатының көздері ретінде пайдаланылмайды. Бұл, 11 - бөлімде қарастырылатын синхронды генераторларға тиісті.

Асинхронды машинаның генераторлық жұмыс режимі *рекуперативті тежеу* үшін пайдаланылады, мысалы, жүк көтерме кранымен түсірілгенде. Жүктің ауырлық күшінің әрекет етуінің әсерінен, жетек асинхронды қозғалтқыштың роторы үдейді және де оның айналмалы жиілігі өрістің айналмалы жиілігінен жоғары болады. Сонымен бірге пайда болатын тежелу сәті жүкті түсіру жылдамдығын шектейді, жүктің кинетикалық қуаты электр қуатына түрленіп, желіге қайта оралады.

Тұрақты ток қозғалтқышын мысалға келтіріп, рекуперативті тежеу 3.8 - бөлімде қарастырылған. Тұрақты ток қозғалтқышының басқа да электрлік тежелу түрлері (3.8 бөлімін қараңыз), сондай-ақ, асинхронды қозғалтқыштарға да қатысты қолданылады.

Асинхронды қозғалтқыштың динамикалық тежелуі. Егер, тұрақты ток қозғалтқышындағы динамикалық тежелу зәкірді көзден реостатқа ауыстыру арқылы іске асырылса, онда асинхронды қозғалтқышта, осыған ұқсас әсерге статор орамасын айнymалы кернеу желісінен ағыту арқылы және оны тұрақты кернеу көзіне қосу арқылы қол жеткізіледі, бұл мақсатта токты қайта қосқыш пайдаланылады. Статор түйіндерінің бірін, сонымен қатар, көздің оң қысқышына қосады, басқа екеуін өзара біріктіреді және көздің теріс қысқышына қосылады. Статор орамасында қозғалмайтын магнит өрісі мен шама бойынша тұрақты болатын тұрақты ток жүретін болады. Инерция бойынша айналуын жалғастыратын ротор орамасында, сонымен бірге, ротор тогын туындататын ЭҚК жүргізіледі. Бұл токтың магнит өрісі статордың қозғалмайтын өрісімен өзара әрекетте болған кезінде, тежелу сәті пайда болады. Негізінде, егер, статор өрісінің айналымы кезінде ротордың айналуын туындататын себептер (9.1 бөлімін қараңыз) пайда болса, онда тыныштықтағы өріс кезінде, осы себептер айналым үстіндегі роторды тоқтатуға талпынады. Қозғалмайтын қозғалтқышты іске қосу кезіндегідей,

айналымдағы роторды динамикалық тежеу кезінде де, статор өрісі роторға қатысты айналымда болады.

Ротор орамасында ықпалдандырылатын ЭҚК айналмалы жиілігінің төмендеу шамасына қарай қысқарады, сондықтан, тежелу сәті де қысқарады.

Тежелу сәтін реттеу үшін фазалық роторы бар қозғалтқышта ротор тізбегіндегі кедергілердің кедергісін өзгертеді, ал қысқа тұйықталған қозғалтқышта тұрақты ток тізбегіне қосылған кедергінің кедергісін өзгертеді.

Асинхронды қозғалтқыштар үшін, сондай-ақ, динамикалық тежеудің бір түрі болып табылатын және машинаның өздігінен қозуына негізделген конденсаторлық тежеуді қолданады. Өздігінен қозуды туындату үшін ротор өзегінің қалған магнит ағыны пайдаланылады. Егер, айналып тұрған қозғалтқышты желіден ағытсақ, онда статор орамасының ЭҚК нөлге тең болмайды, себебі, ротордың қалған ағыны фаза бойынша $\pi/2$ артта қалған, статордың әр фазасында қалған ЭҚК индукциялайды. Егер, желіден ағытумен қатар, статор орамасын конденсаторлар батареясына қосса, онда қалған ЭҚК әрекет ету әсерінен ЭҚК фаза бойынша $\pi/2$ алда болатын ток жүреді, мұндай сыйымдылықты жүктеме кезінде болады. Нәтижесінде, осы токпен туындайтын магнит ағыны фаза бойынша қалған магнит ағынына сәйкес болады, мұның нәтижесінде жалпы магнит ағыны артады. Ағынның артуы статордың ЭҚК артуына әкеледі және ауқымдық кедергідегі кернеуінің төмендеуімен ЭҚК теңгерілмейінше үдеріс ары қарай жалғаса береді (2.4 - бөлімде баяндалған, тұрақты ток генераторының өздігінен қозуымен салыстырыңыз).

Өздігінен қозумен пайда болған статор өрісі ротор орамасында токтың болуынан туындаған оның өрісімен өзара әрекетте болған кезде тежелу сәті пайда болады. Тежелу шамасына қарай, екі өріс те бәсеңдейді және олармен қоса тежелу сәті де төмендейді.

Кері қосумен тежеу. Статор өрісінің айналмалы бағытын өзгертумен жүзеге асырылады. Бұл үшін статор орамасын үш фазалық желімен байланыстыратын үш сымның екеуінің орындарын ауыстырып-қосқыш арқылы ауыстырады. Асинхронды қозғалтқышты үдететін себептер енді оның тежелуін туындатады: ротор айналып тұрған статор өрісінің соңымен жүруге бағытталады.

Кері қосумен тежеу үдерісі кезінде, ротордың және статор өрісінің айналмалы бағыттары қарама-қарсы болады және де сырғу бірден артық болады ((9.2) өрнегі мен 9.6 суретін қараңыз). Сонымен қатар,

ротор тогы іске қосу тогынан артық болады (іске қосу кезінде $s = 1$ болатынын ескере отырып, (9.11) теңдігін қараңыз). Сондықтан, кері қосумен тежеу кезінде, ротордың тізбегіне белсенді кедергіні енгізу қажет. Осылайша, осы, тежеудің аса тиімді тәсілі фазалық роторы бар қозғалтқыштарда ғана пайдаланыла алады.

Айналмалы жиілігін нөлге дейін азайтқаннан кейін, қозғалтқышты желіден ағыту керек, әйтпесе, ол кері қарай үдей бастайды (реверс).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың негізінде жатқан құбылыстарды сипаттаңыз.
2. Асинхронды машина роторының сырғуы деп нені айтамыз?
3. Асинхронды машинаның қысқа тұйықталған және фазалық роторларының құрылымдарын сипаттаңыз. Фазалық ротордың түйіспелі сакинасының қызметі қандай?
4. Неге асинхронды қозғалтқыштың техникалық құжаттамасында номиналды кернеудің екі мәні көрсетіледі? Статор орамасы фазаларын байланыстыру тәсілін таңдау неге байланысты болады?
5. Асинхронды қозғалтқыштың роторы мен статор орамасы кернеуінің теңдігін жазыңыз. Осы теңдіктер мен трансформатор орамалары кернеулерінің теңдіктерін салыстырмалы түрде талдаңыз.
6. Ротор тогының жиілігі неге тәуелді болады және ротор тогының мәніне ол қалай әсер етеді?
7. Айналмалы роторды эквивалентті қозғалмайтынға алмастыру деген сөздер қандай мағынаны береді? Осындай алмастыруды есепке ала отырып, ротор тогының теңдігін жазыңыз.
8. ЭҚК трансформациясы коэффициенттері мен асинхронды қозғалтқыш тогының трансформатордың трансформациялау коэффициентінің ерекшелігі неде?
9. Ротор орамасы шамаларын айналым сандары мен статор орамасы фазалары сандарына келтіру қандай мақсатта іске асырылады? Келтірудің шарттары қандай?
10. Асинхронды қозғалтқыш пен трансформатордың векторлық диаграммаларының ұқсастықтары неде? Бұл диаграммалардың бір-бірінен ерекшелігі неде?
11. Асинхронды қозғалтқышты алмастыру сұлбасын сызыңыз және оны трансформаторды алмастыру сұлбасымен салыстырыңыз.

12. Асинхронды қозғалтқышта қандай шығындардың қуаты бар? Қозғалтқыштың электрмагниттік қуаты нені сипаттайды?
13. Қозғалтқыш режиміндегі; генератор режиміндегі; кері қосумен тежеу режиміндегі асинхронды машинаның жұмысына сырғудың қандай мәндері сәйкес болады?
14. Асинхронды қозғалтқыштың электрмагниттік иінкүшінің ротор тізбегінің белсенді кедергісіне тәуелді болуының ерекшеліктері қандай?
15. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс сипаттамаларының түрлерін сипаттаңыз және түсіндіріңіз.
16. Асинхронды қозғалтқышты іске қосудың қандай тәсілдері бар? Қысқа тұйықталған роторы бар қозғалтқыштар мен фазалық роторы бар қозғалтқыштар үшін қандай тәсілдер қолданылады? Іске қосудың әр тәсілінің артықшылықтары мен кемшіліктерін атаңыз.
17. Жаксартылған іске қосу қасиеттері бар қысқа тұйықталған конструкциялардың ерекшеліктері неде? Қарапайым «беличья клетка» құрылғымен салыстырғанда, осындай роторлардың іске қосу қасиеттерін жаксарту дегеніміз не?
18. Асинхронды қозғалтқыштардың айналмалы жиілігін реттеу тәсілдерін атаңыз. Қысқа тұйықталған роторы бар қозғалтқыштар мен фазалық роторы бар қозғалтқыштар үшін қандай тәсілдер қолданылады?
19. Асинхронды қозғалтқыштардың электрлік тежеу тәсілдерін сипаттаңыз. Әр тәсілдің артықшылықтары мен кемшіліктерін атаңыз.

АСИНХРОНДЫ МАШИНАЛАРДЫҢ АРНАЙЫ ТҮРЛЕРІ

10.1. ИНДУКЦИЯЛЫҚ РЕТТЕГІШ ЖӘНЕ ФАЗА РЕТТЕГІШ

Индукциялық реттегіш. Ол сонымен қатар потенциал-реттегіш және бұрмалы автотрансформатор деп аталады — бұл кернеуді кең шектерде реттеу үшін арналған *роторы тежелген асинхронды машина*. Реттегіштің роторына *ф а з а л ы қ о р а м а* орнатылады. Кернеу роторды бұру арқылы реттеледі. Роторды бұрған кезде электр қозғалтқыш күштер арасында статор мен ротор орамаларының фазаларындағы айналып тұратын магнитті өріспен туындайтын фазалардың ауытқуы өзгереді. Роторды бұрып, тежелген күйде ұстап тұру үшін *өздігінен тежелетін бұрамдықты беріліс* қызмет атқарады (мұндай берілісте бұрандалы бетінің бұғу бұрышының тангенс үйкелу коэффициентінен кем болады).

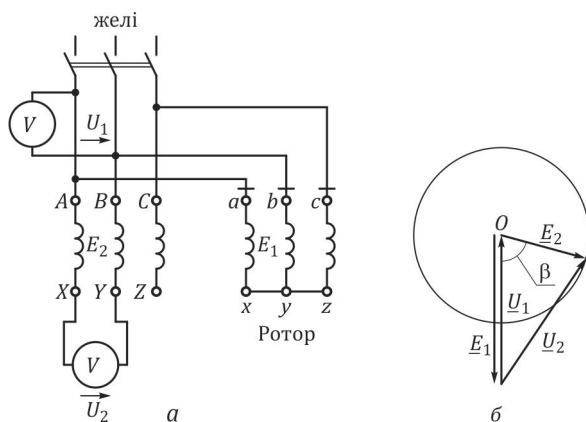
Үш фазалы индукциялық реттегіштің сұлбасы 10.1, *а* - суретінде көрсетілген. Статор орамалары фазаларының басы (*A, B, C*) U_1 желілік кернеуі бар үш фазалы желіге жалғанған. Осы желіге щеткалар мен сақиналардың жылжымалы түйіспелері арқылы ротор орамасы фазаларының басы жалғанған (*a, b, c*). (Жылжымалы түйіспелер сұлбада көлденең сызықшалармен белгіленген.) Ротор орамасының ұштары (*x, y, z*) бір-біріне тұйықталған. Осылайша, ротордың орамасы жұлдызша түрінде жалғанған және ротор орамасының фазалардағы кернеу ротордың кеңістікте орналасқан орнына қарамастан әрқашан желінің фазалық кернеуіне тең. Статор орамасы фазаларының ұштары (*X, Y, Z*) желіге энергия қабылдағыштың желісіне жалғанған, оның кернеуі U_2 индукциялық реттегіштің роторын айналдыру арқылы реттеледі. Индукциялық реттегіштің орамаларын жалғау бойынша сипатталған сұлба *автотрансформаторлық* сұлба деп аталады.

Реттегіштің әрекетін реттегіштің бір фазасы үшін салынған векторлық диаграмма (10.1, *б* суреті) түсіндіреді. Реттегіш үш фазалы желіге қосылған кезде жылжымайтын ротордың орамасымен айна-

лып тұратын өрісті туғызатын үш фазалы токтар жүйесі өтеді. Бұл өріс ротор орамасы фазаларында $E_{1\phi}$ ЭҚК-ны және статор орамасы фазаларында $E_{1\phi}$ ЭҚК-ны индуциялайды. Реттегіш бос жүріс режимінде жұмыс істеп (статордың X, Y, Z қысқыштарына жүктеме қосылмаған), статор орамасында ток жоқ дерлік. Егер ротор орамасының кедергісіндегі кернеудің түсуін елемейтін болсақ, мынаны жазып алуға болады: $\underline{U}_{1\phi} = -\underline{E}_{1\phi}$ немесе желілік кернеу мен желілік ЭҚК үшін $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$ ((5.1) өрнегін қараңыз), яғни $\underline{E}_1$ векторы ротор кеңістікте кез келген жерде орналасқан жағдайда $\underline{U}_1$ векторына көлемі бойынша тең және бағыты бойынша қарама-қарсы болады.

Ескертпе. Барлық пайымдар фазалық кернеулер мен ЭҚК үшін жүргізіледі, бірақ одан әрі шамалардың белгіленімдерінде «ф» индексі қолданылмайтын болады, өйткені *желілік* шамалар үшін осындай арақатынас дұрыс болады, ал $\underline{U}_2$ желілік кернеуі шықпа шамасы болып табылады.

Векторлық диаграмманы салу қолайлы болу үшін ротор фазасының ЭҚК-сы статор фазасының ЭҚК-нан артық деп есептейік: $E_1 > E_2$. Егер ротор мен статордың магнитті өрістерінің осьтері сәйкес келетіндей етіп ротор орналасатын болса, ротор мен статордың орамаларындағы айналып тұратын магнитті өріспен индуциялайтын ЭҚК күштері фаза бойынша сәйкес келеді, яғни бұл жағдайда векторлық диаграммада $\underline{E}_2$ векторы бағыты бойынша $\underline{E}_1$ векторына сәйкес келеді.



10.1.-сурет. Үш фазалы индукциялық реттегіш:

a — сұлба; b — векторлық диаграмма

Егер роторды *магнитті өрістің айналу бағыты бойынша* β бұрышына бұратын болсақ, айналып тұратын өрістің күштік желілері ротор шарғысының орамдарына қарағанда статор шарғысының орамдарын бұрын кесіп өтеді. Бұл жағдайда статордың ЭҚК күші фаза бойынша ротордың ЭҚК күшінен озып түседі, яғни көлемі бойынша өзгермейтін статор ЭҚК күшінің $\underline{E}_2$ векторы $\underline{E}_1$ векторына қатысты алғанда β бұрышына басып түсу жағына бұрылады (бұл жағдай 10.1, б суретінде көрсетілген).

Роторды β бұрышына *өріске қарсы* бұрған жағдайда, статордың ЭҚК күші фаза бойынша ротордың ЭҚК күшінен артта қалады және диаграммада $\underline{E}_2$ векторы $\underline{E}_1$ векторына қатысты алғанда β бұрышына артта қалу жағына бұрылады.

Ротордың бұрылу бұрышын өзгерте отырып, біз статор мен ротордың ЭҚК векторлары арасындағы бұрышты өзгертеміз және статордың ЭҚК күшінің $\underline{E}_2$ векторы өзінің орналасқан орнын осы вектордың ұшы $\underline{E}_1$ векторының басы және $\underline{U}_1$ векторының ұшы болып табылатын O нүктесі ортасында болатын $\underline{E}_2$ радиусының шеңберін салып өтетіндей етіп өзгертеді.

Электр энергиясын қабылдағыштағы желінің $\underline{U}_2$ кернеуі $\underline{U}_1$ және $\underline{E}_2$ векторларының жиынтығы ретінде анықталады:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \underline{E}_2 \quad (10.1)$$

Салыстыру үшін *трансформаторда* бос жүріс кезінде $\underline{U}_2 = \underline{E}_2$ екендігін еске түсірейік ((5.2) өрнегін қараңыз). 10.1, б суретінде $\underline{U}_2$ векторы тепе-теңдікке сәйкес салынған (10.1).

$\underline{U}_2$ кернеуінің сандық мәнін U_2 , U_1 және E_2 жақтары бар үшбұрыш үшін жазылған косинустар теоремасы арқылы есептеуге болады.

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 + E_2^2 - U_1 E_2 \cos \beta}. \quad (10.2)$$

Егер машинада p полюстар жұптарының саны бірліктен көп болса, β бұрышының электр градусымен өлшенетіндігін айта кетейік, бұл ретте

$$\beta(\text{эл.град.}) = p\beta^\circ, \quad (10.3)$$

бұл 8.2-бөлімінде берілген пайымдаулардан шығады.

Сонымен қатар, егер полюстар жұптарының саны екіге тең болса, бірінен кейін бірі келетін *бір атмас* полюстар арасындағы бұрыш 180° -ға немесе 360 эл. градусқа тең болады.

Ротордың бұрылу бұрышын 0 -ден 180 эл. градусқа дейін өзгерткен жағдайда, $U_{2\min} = U_1 - E_2$ бастап $U_{2\max} = U_1 + E_2$ дейінгі шектерде реттегіштің шықпа қысқыштарында кез келген кернеуді алуға бола-

ды.

Егер реттегіштің трансформация коэффициенті $k=1$ болса, яғни $E_2 = E_1 = U_1$ болса, $U_{2\min} = 0$ және $U_{2\max} = 2U_1$ болады.

Фаза реттегіш (бұрмалы трансформатор). Көздердің қысқыштарындағы кернеулер мен жүктеме арасындағы фазалардың ауытқуын 0-ден 360° -қа дейін өзгерту үшін арналған. Фаза реттегіш индукциялық реттегіштен қосу сұлбасымен ғана ерекшеленеді: оның статор орамасы үш фазалы желіге, ал ротор орамасы жүктеменің үш фазасына жалғанады. Осылайша, индукциялық реттегішке қарағанда автотрансформаторлық емес трансформаторлық қосу сұлбасы қолданылады. Бұл жағдайда роторды бұрамдықты беріліс арқылы бұрған кезде кірме және шықпа кернеу арасындағы фаза өзгереді, бірақ шығыс кернеудің мәні өзгермейді.

Фаза реттегіштер автоматика құрылғыларында фазалық басқару үшін қолданылады.

10.2. БІР ФАЗАЛЫ ЖӘНЕ КОНДЕНСАТОРЛЫҚ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР

Бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың жұмыс істеу қағидасы. Егер қысқа тұйықталған асинхронды қозғалтқыштың статорын бір фазалы орамамен жабдықтап, оны бір фазалы синусоидалық кернеу көзіне қосатын болсақ, ол синусоидалық заң бойынша өзгертін айналмайтын өтіп тұрған магнитті ағынды туғызады. Мұндай ағын әрбір жарты кезең сайын өз бағытын 180° -қа өзгертеді.

Үдерістерді талдау үшін бір фазалы қозғалтқышта қарсы бағытта айналатын бірдей шамадағы екі ағынды қабаттастыру нәтижесі ретінде өтіп тұрған магнитті ағынды ұсыну қолайлы. Мұндай ұсыну келесі ұғынысқа негізделген: егер B модулі бар екі вектор қарсы бағытта бірдей жиілікте айналатын болса, олардың жиынтығы болып табылатын вектор синусоидалық заң бойынша өзгереді; оның модулі 0-ден $2B$ -ға дейін мәнге жетеді және құрамдас векторлар айналатын әрбір жарты кезең сайын ол өз бағытын қарсы бағытқа өзгертетін болады.

Осылайша, бір фазалы орамада туындаған Φ магнитті ағынды шамасы бойынша бірдей айналатын екі ағынға бөлуге болады: $\Phi_{\text{пр}}$ тіке ағын және $\Phi_{\text{обр}}$ кері бағыттағы ағын, бұған қоса қосымша жағдайларды жүктемей-ақ бұл ағындар тең құқылы және тіке бағыт өздігінен таңдалады.

Қозғалтқыштың роторына қарама-қарсы бағытта айналатын екі

магнитті ағын жағынан әрекет ететін айналдыратын иінкүштер бір-бірін теңгереді, сондықтан қосу иінкүші нөлге тең болады.

Бір фазалы желіге қосылған қозғалтқыштың роторына оны статордың тіке және кері бағыттағы ағындарының айналу жиілігінен аз болатын n_2 жиілікпен айналуға мәжбүрлей отырып, қандай да бір механизм жағынан сыртқы айналдыратын иінкүшке жақындатайық. Берілген айналу бағытын тіке бағыт ретінде қарастырамыз. Статордың $\Phi_{\text{пр}}$ тіке ағыны бұл ретте роторға қатысты алғанда мынадай айналу жиілігіне ие болады

$$n_{\text{пр}} = n_1 - n_2$$

n_2 жиілігін n_1 жиілігі арқылы және s сырғуды (9.2): $n_2 = n_1(1 - s)$ тепе-теңдігіне сәйкес өрнектейік. Сонда

$$n_{\text{пр}} = n_1 - n_1(1 - s) = n_1 s$$

$\Phi_{\text{обр}}$ кері бағыттағы ағын роторға қатысты алғанда мынадай жиілікпен айналады

$$n_{\text{обр}} = n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1 - s) = n_1(2 - s).$$

s сырғу бірліктен аз, ал айырма $(2 - s)$ бірліктен көп. Бұл жағдайда роторда тіке ағынмен туындаған $E_{2\text{пр}}$ ЭҚК және $I_{2\text{пр}}$ тогы желі кернеуінің жиілігіне қарағанда аз жиілікке ие:

$$f_{2\text{пр}} = s f_1 \quad (10.4)$$

Кері бағыттағы ағынмен туындаған $E_{2\text{обр}}$ ЭҚК және $I_{2\text{обр}}$ тогы керісінше желі кернеуінің жиілігіне қарағанда көп жиілікке ие:

$$f_{2\text{обр}} = (2 - s) f_1 \quad (10.5)$$

Тіке және кері бағыттағы ағындардың ротор орамаларындағы токтармен өзара әрекетке түсуінің нәтижесінде қарама-қарсы бағытталған айналдыратын иінкүштер туындайды:

$$M_{\text{пр}} = C \Phi_{\text{пр}} I'_{2\text{пр}} \cos \psi_{2\text{пр}}; \quad M_{\text{обр}} = C \Phi_{\text{обр}} I'_{2\text{обр}} \cos \psi_{2\text{обр}} \quad ((9.29) \text{ теңдігін қараңыз}).$$

Бұрын баяндалғандай тіке және кері бағыттағы ағындар бір-біріне тең болады. Тіке және кері бағыттағы айналдыратын иінкүштердің мәндері ротордың белсенді құрамдас токтарына, яғни $I'_{2\text{пр}} \cos \psi_{2\text{пр}}$ және $I'_{2\text{обр}} \cos \psi_{2\text{обр}}$ өрнектерінің мәндеріне байланысты болады.

Аз сырғу кезінде кері бағыттағы токтың жиілігі қуат беру кернеуінің қос жиілігіне жақын болады ((10.5) өрнегіне сәйкес $f_{2\text{обр}}$ мәнінің $2f_1$ мәнінен айырмашылығы аз). Мұндай жиілік кезінде ораманың белсенді кедергіден едәуір асатын индуктивті кедергісі бар, сондықтан $\psi_{2\text{пр}}$ фазалық бұрышы $\pi/2$ мәніне жақын және кері бағыттағы токтың $I'_{2\text{пр}} \cos \psi_{2\text{пр}}$ белсенді құрамдас бөлігі болмашы болады.

(10.4) өрнегімен анықталатын *тіке токтың* жиілігі аз; $\psi_{2\text{пр}}$ бұрышы нөлге жақын, және $\cos \psi_{2\text{пр}}$ бірліктен аз ерекшеленеді. Осы-

лайша, тіке токтың белсенді құрамдас бөлігі кері бағыттағы токтың белсенді құрамдас бөлігінен біршама артық. Осы себеппен Мпр тіке айналдыратын иінкүші $M_{обр}$ кері бағыттағы иінкүштен артық болады. Сонда нәтижелік иінкүш $M=M_{пр}-M_{обр}$ оң болады, яғни *тіке иінкүш жағына* бағытталған.

Біз мынадай қорытындыға келдік: *егер бір фазалы орамасы бар асинхронды қозғалтқыштың білігіне қандай да бір бағытта айналу хабарланатын болса, нөлге тең болмайтын, сол бағытта айналатын электромагнитті иінкүш пайда болады және сыртқы әсер қажетті болудан қалады.*

Өтіп тұрған магнитті өрісті екі айналатын ағынға бөлу қағидасына сәйкес бір фазалы орамасы бар асинхронды қозғалтқыш бір білігі бар және қарама-қарсы бағытталған электромагнитті иінкүштерді туғызатын екі бірдей үш фазалы қозғалтқышқа тең түседі. Осы иінкүштер тең болған кезде қосу иінкүші нөлге тең болады. Егер, бөгде әсер есебінен білікті синхронды жиіліктен аз болатын жиілікпен қандай да бір бағытқа айналдыратын болса, қаралып отырған бір қозғалтқыштың айналдыратын иінкүші сыртқы әсердің бағытына сәйкес келеді. Осы қозғалтқыштың сырғуы $s_{пр} = s$ 0-ден 1-ге дейінгі интервалда болады. Екінші қозғалтқыш бұл ретте сыртқы әсерге қарсы бағытталған айналдыратын иінкүшке ие болады және оның сырғуы 1-ден 2-ге дейінгі интервалда болады ($s_{обр} = 2 - s$). Әртүрлі сырғуға сәйкес келетін айналдыратын иінкүштерді қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы бойынша анықтауға болады (9.6-суреттегі R_{21} ротор тізбегінің кедергісі үшін салынған қисықты қараңыз). Сипаттамадан бірліктен аз болатын сырғулар кезінде айналдыратын иінкүш бірліктен асатын сырғу кезімен салыстырғанда артық болатындығын көруге болады (соңғы жағдай қосуға қарсы тежеу режиміне сәйкес келеді). Сонда білігі ортақ екі қозғалтқыштың жиынтық айналдыратын иінкүші сыртқы әсердің жағына бағытталады. Егер білікте механикалық жүктеме болмаса, екі қозғалтқыштың жүйесі өздігінен сол бағытта айналу бастау үшін кез келген бағытқа азғана итеру ғана жеткілікті.

Осылайша, өтіп тұрған магнитті өрісті екі айналатын өріске бөлу негізінде бұрын жасалған тұжырым екі үш фазалы қозғалтқыштың моделінде расталды.

Бір фазалы асинхронды қозғалтқышты қосу. Конденсаторлық қозғалтқыш. Бір фазалы асинхронды қозғалтқышты электр тәсілімен (сыртқы механикалық әсердің көмегімен) айналдыру үшін қосу уақытына айналатын магнитті өрісті туғызу қажет. Ол үшін:

- статорға бір-біріне қатысты алғанда 90 эл. град. бұрышқа

кеңістікте жылжытылған екі ораманы орнату;

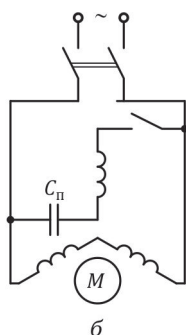
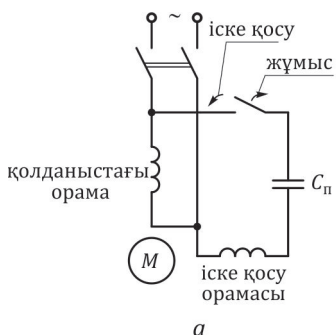
- осы орамалардың токтары арасындағы фазаның нөлдік емес ауытқуды қамтамасыз ету қажет. Бұл жиірек C_{Π} қосу конденсаторының бір орамасын тізбекке қосу арқылы жасалады (10.2, *а* суреті).

Неғұрлым көп қосу иінкүші ($2M_{\text{ном}}$ дейін) қосу уақытына *айналы* магнитті өрісті туғызу кезінде қамтамасыз етіледі (9.8-бөлімді қараңыз), ол үшін қос ораманың МҚК-сы тең болуы, ал орамалардың токтары фаза бойынша $\pi/2$ шамасына ауытқуы керек.

Конденсаторды қосатын қосу орамасының тізбегі желіге қосу кезеңіне ғана жалғанады. Қосу орамасы токтың қысқа мерзімде өтуіне есептелген. Қосу жүзеге асырылған соң қосу орамасының тізбегі реле немесе ортадан тепкіш сөндіргіш көмегімен сөндіріледі және желіге қолданыстағы орама ғана жалғанып қалады. Бұл ретте айналып тұратын бір фазалы қозғалтқыштың роторына $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$ оң иінкүші әсер етеді.

Бір фазалы желіден *үш фазалы асинхронды қозғалтқыш* жұмыс істей алады. Оны қосу бойынша мүмкін сұлбалардың бірі 10.2, *б* суретінде көрсетілген. Үш фазалы қозғалтқыш бір фазалы желіден жұмыс істеген кезде үш фазалы желіден жұмыс істеу кезімен салыстырғанда оның қосу және қолданыстағы қасиеттері нашарлау болады.

Конденсаторлық қозғалтқыштың бір фазалы қозғалтқыштан ерекшелігі – іске қосқан соң құрамында конденсатор (конденсаторлар батареясы) бар оның орамасының тізбегі сөнбейді, қозғалтқыштың жұмыс істеу үдерісінде магнитті өрістің айналуын қамтамасыз етеді. Бұл қозғалтқыштың қолданыстағы қасиеттерін жақсартады. Конденсаторлық қозғалтқыштың екі орамасы токтың ұзақ өтуіне есептелген. Конденсатор бұл жағдайда қосу емес қолданыстағы болып табылады.



10.2.-сурет. Бір фазалы желіге қосу сұлбалары: *а* — бір фазалы асинхронды қозғалтқыш; *б* — үш фазалы асинхронды қозғалтқыш (сұлбаның бірі)

Егер конденсаторлық қозғалтқыштың қосылуы білікке аз жүктеме түскен кезде орын алатын болса, қосу иінкүшін қолданыстағы конденсаторға параллель түрде арттыру үшін қосу конденсаторын қосу қажет. Қозғалтқыш екпін алған соң қосу конденсаторын сөндіру қажет, өйткені аз сырғу кезінде индуктивті және ыдыстық кедергісі бар статор орамасының тізбегінде кернеулердің резонанс жағдайы туындауы мүмкін, ол кезде орама мен конденсатордағы кернеу желідегі кернеуден 2-3 есе артып кетуі мүмкін.

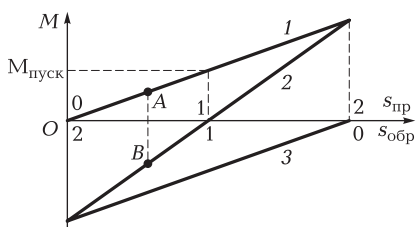
10.3. АТҚАРУШЫ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ

Атқарушы асинхронды қозғалтқыш басқару және реттеу жүйелерінде электр сигналын механикалық қозғалысқа түрлендіру үшін арналған (тұрақты токтың атқарушы қозғалтқыштары 3.9-бөлімде қарастырылған).

Атқарушы асинхронды қозғалтқыштар механикалық сипаттамаларының тура сызықтығымен, үлкен қосу иінкүшімен, айналу жиілігін кең шектерде бірқалыпты реттеу мүмкіндігімен, үйкелетін түйіспелердің жоқ болуымен ерекшеленеді. Бұл қозғалтқыштар ватт үлесінен жүздеген ваттқа дейінгі қуатқа және 50 Гц-тен 500 Гц-ке дейінгі кернеу жиілігінен жасалады (соңғы жағдайда 30 000 айн/мин-қа дейін айналу жиілігі қамтамасыз етіледі).

Атқарушы асинхронды қозғалтқыштың статорына кеңістікте 90 эл. градусқа ауытқыған екі бір фазалы орама орнатылады. Екі ораманың токтары арасында фазалық ауытқуды қамтамасыз ету үшін әдетте бір орамадан жүйелі түрде конденсатор қосылады. Атқарушы қозғалтқыштың аталған ерекшеліктері конденсаторлық қозғалтқыштың негізгі ерекшеліктерін қайталайды (10.2-бөлімін қараңыз). Алайда соңғысына қарағанда атқарушы қозғалтқыштың статорының екі орамасы сол бір фазалы желіден емес әртүрлі екі көзден қуат көзін алады. Ораманың бірі — қ о з д ы р у о р а м а с ы — үнемі бір фазалы желіге қосылуы болады. Осы ораманың тізбегіне жиі жағдайда конденсатор қосылады. Екінші орамаға — б а с қ а р у о р а м а с ы н а — басқарушы кернеу беріледі. Ол басқару жүйесінің күшейткіші арқылы жүзеге асырылады. Күшейткіш арқылы сонымен қатар қажетті фазалық ауытқуды туғызуға болады және бұл жағдайда қоздыру тізбегінде конденсатор болмайды.

Бұрын атқарушы асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасының турашылдығы – электромагнитті иінкүштің сырғуға тәуелділігі атап өтілген болатын (9.5-бөлімін қараңыз). Тік механи-



10.3.-сурет. Атқарушы асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары:

1 — статордың магнитті өрісін тіке бағытта айналдыру кезінде; 2 — басқарушы кернеу болмаған жағдайда; 3 — статордың өрісін кері бағытта айналдыру кезінде

калық сипаттамаларға қол жеткізу үшін ротордың орамасы жоғары белсенді кернеуге ие болуға тиіс. 9.6-суретте көрсетілген екі сипаттаманы салыстыра отырып, R_{22} ротор орамасының ұлғайтылған белсенді кедергісіне сәйкес келетін сипаттаманың R_{21} аз кедергіге сәйкес келетін сипаттамаға қарағанда сырғу мәндерінің үлкен интервалында біркелкі артуын көруге болады. Кедергіні одан әрі арта отырып, сипаттаманың ұлғаюына және $s = 2$ дейін сырғу мәндері үшін желілік тәуелділікке жақындауына қол жеткізуге болады, мұны 10.3-суретте 1-сипаттама көрсетеді.

Статордың екі орамасында кернеу болған жағдайда, машинаның магнитті өрісі айналатын өріс болып табылады (10.2-бөлімін қараңыз). Басқарушы орамаға кернеудің келуі тоқтаған кезде, машинада 10.2-бөлімінде берілген пайымдауларға сәйкес қарама-қарсы бағытта айналатын екі өрісті қабаттастыру нәтижесі ретінде берілетін қоздыру орамасының өтіп тұрған өрісі ғана әрекет етеді. 10.3-суреттегі 1-сипаттама тік айналатын магнитті өріске, 3-сипаттама кері бағытта айналатын өріске, ал 2-сипаттама екі өрісті қабаттастыру нәтижесіне, яғни өтіп тұрған өріске сәйкес келеді (2-сипаттаманың әрбір нүктесінің ординатасы 1-ші және 3-сипаттамалардың тиісті нүктелерінің ординаттарының алгебралық жиынтығы болып табылады).

Егер басқарушы кернеу болған кезде қозғалтқыштың жұмыс режимін 1-сипаттаманың A нүктесі анықтайтын болса, басқарушы кернеу сөнген кездегі уақыт мезетінде жұмыс режимі 2-сипаттаманың B нүктесімен анықталады, өйткені бұл нүкте сол сырғуға (сол айналу жиілігіне) сәйкес келеді. A нүктесіне оң электрмагнитті иінкүш, ал B нүктесіне теріс электрмагнитті иінкүш сәйкес келеді. Бұл басқарушы кернеуді сөндірген кезде қозғалтқыштың тежелетіндігін білдіреді. Осылайша, ротор орамасының кедергісі жоғары болатын қозғалтқыш өздік берістің болмауымен сипатталады, яғни ол басқарушы кернеуді беруді тоқтатқан кезде тоқтайды.

Ротордың жоғары кедергісін қамтамасыз ету үшін ол тұрақты

токтың атқарушы қозғалтқышының іші қуыс роторына ұқсас жұқа қабырғалы алюминий стакан түрінде орындалады. Осылайша, тағы бір қозғалтқыштың аз инерциялығын қамтамасыз ету мәселесі шешіледі. Мұндай қозғалтқыш белгіленген айналу жиілігіне тез жетеді. Оған елеулі қосу иінкүші ықпал тигізеді. I-сипаттамаға сәйкес әлі айнала қоймаған қозғалтқыштың айналдыратын иінкүші (сырғу бірлікке тең болған кезде) қозғалтқыш тік бағытта айналатын кезге қарағанда неғұрлым жоғары мәнге ие болады (бірліктен кем болатын сырғу кезінде).

Іші қуыс роторы бар атқарушы қозғалтқыштың екі статоры бар: сыртқы және ішкі. Сыртқы статорға орамалар орнатылған, ал іші қуыс ротордың ішінде болатын ішкі орама магнитті кедергіні азайту үшін қызмет етеді.

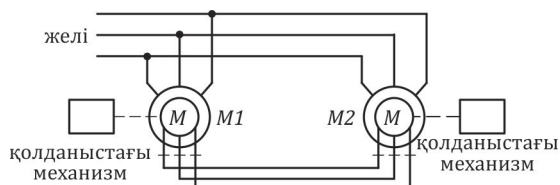
10.4.

АСИНХРОНДЫ МАШИНАЛАРДЫҢ СИНХРОНДЫ БАЙЛАНЫСЫ

Машиналардың синхронды байланысы механикалық түрде бір-біріне байланысы жоқ екі немесе одан көп біліктердің бір уақытта айналуын («электрлік білік» жүйесі) не болмаса біліктердің берілген бұрышқа бір уақытта бұрылуын («бұрыш беру» жүйесі) қамтамасыз етеді. Мұндай жүйелер қашықтықтан басқару, бақылау және реттеу үшін қолданылады.

«Электрлік білік» жүйесі. Бұл жүйе 10.4-суретте көрсетілген. Фазалық роторы бар бірдей $M1$ және $M2$ асинхронды қозғалтқыштары бір-бірінен едәуір қашықтықта орналасқан және жалпы білікпен байланыса алмайтын қолданыстағы механизмдерді қозғалысқа келтіреді. Бұл ретте механизмдердің айналу жиіліктерінің тепе-теңдігін қамтамасыз ету қажет.

«Электрлік білікке» қол жеткізу үшін бір қозғалтқыштың ротор орамасының әрбір шығуы екінші қозғалтқыштың ротор орамасының тиісті шығуына электрлі жалғанады. Егер роторлар синхронды



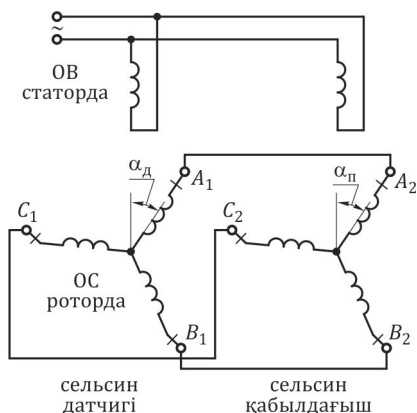
10.4.-сурет. «Электрлік білік» жүйесі.

түрде айналатын болса, $M1$ қозғалтқышының ротор орамасының әрбір фазасының тогы $M2$ қозғалтқышының ротор орамасының тиісті фазасының тогына тең түседі және фаза бойынша бұл токтар сәйкес келеді. Ротор орамаларының шықпаларын біріктіретін сымдарда токтар бір-біріне бағытталған, сондай-ақ жалғағыш сымдардың әрқайсысында және ротор орамасының әрбір фазасында өтетін жиынтық ток нөлге тең.

Егер бір қозғалтқышта екіншісіне қарағанда білікке неғұрлым көп жүктеме түсетін болса, оның айналу жиілігі азаяды және әрбір жалғағыш сымдағы және орамалар фазаларындағы жиынтық ток нөлдік мәнді қабылдайды. (Токтарды біріктіру нәтижесінің біріктірілетін токтардың мәндері мен олардың арасындағы фазалардың айырмасына байланысты екендігін ескерген жөн.) Екі қозғалтқыштың әрқайсысында токтар өткен кезде туындайтын ротордың магнитті өрісі статордың айналып тұратын магнитті өрісімен өзара әрекетке түседі. Осы өзара әрекеттің нәтижесінде асинхронды қозғалтқыштарда токтардың пайда болу себептерін жою үшін бағытталған электрмагнитті иінкүштер туындайды. (9.1-бөлімде қарастырылған асинхронды қозғалтқыштардың жұмыс істеу қағидасын түсіндіретін құбылыстардың ротор тогын азайтуға бағытталған электрмагнитті иінкүштердің туындауына әкеп соғатындығын еске сала кетейік.) Қозғалтқыштарды «электрлік білік» жүйесіне біріктіру кезінде қосымша механикалық жүктеме алған қозғалтқыштың айналуын үдететін иінкүш пен екінші қозғалтқыштың айналуын баяулататын иінкүш пайда болады. Осы иінкүштердің әрекеті екі қозғалтқыштың айналу үйлесімділігінің қалпына келтірілуіне әкеп соғады.

«Бұрыш беру» жүйесі екі машинадан тұрады, бірі - бұрылыс датчигі, ал екіншісі – қабылдағыш болып табылады. Бұл машиналар сельсиндер деп аталады (*ағылшын сөзі* self-synchronizing— өздігінен синхрондалатын). Бірнеше сельсин-қабылдағыштарға бір сельсин-датчигі жұмыс істеуі мүмкін. Конструкциясы бойынша сельсин статорында тұрақты токтың бір фазалы желісіне қосылған және қоздыру орамасы (ҚО) (10.5-сурет) болып табылатын бір фазалы орнатылған фазалық роторы бар асинхронды қозғалтқышқа ұқсайды. Синхрондаудың үш фазалы орамасы (СО) роторда орналасқан. Ротордың орамасы сыртқы шықпаларға сақиналар мен щеткалардың жылжымалы түйіспелері арқылы жалғанған. Датчик пен қабылдағыштың ротор орамаларының тиісті шықпалары бір-біріне электрлік жалғанған. (Сонымен қатар орамаларды кері қайтымды ор-

10.5.-сурет. «Бұрыш беру» жүйесі.



наластыру қолданылады, ол кезде бір фазалы қоздыру орамасы роторға, ал синхрондау орамасы статорға орнатылады.)

Сельсиндердің қоздыру орамаларында бір фазалы ток өткен кезде өтіп тұрған магнитті өрістер пайда болады. Олар синхрондау орамаларының әрбір фазасында ЭҚК индукциялайды. Осы ЭҚК фаза бойынша сәйкес келеді (өйткені бір уақытта индукциялайды), бірақ синхрондау орамасының әрбір фазасының қоздыру орамасына қатысты алғанда орналасуына байланысты болатын мәндер бойынша ерекшеленеді. Мысалы, егер сельсин-датчиктің A фазасында $E_m \cos \alpha_d$ амплитудамен ЭҚК индукциялайтын болса, B және C фазаларындағы ЭҚК амплитудалары бұл ретте тиісінше $E_m \cos(\alpha_d - 2\pi/3)$ және $E_m \cos(\alpha_d - 4\pi/3)$ мәндеріне тең болады (мұндағы E_m — қоздыру орамасы өрісінің осі синхрондау орамасының бір фазасы өрісінің осіне сәйкес келгенде орын алатын максималды ЭҚК амплитудасы).

Егер датчик пен қабылдағыштың роторлары қоздыру орамаларына қатысты бірдей орналасқан болса ($\alpha_d = \alpha_n$), датчик пен қабылдағыштың синхрондау орамаларының бірдей фазаларында тең болатын ЭҚК индукциялайды. Датчиктің әрбір фазасы қабылдағыштың тиісті фазасына жалғанғандықтан, ЭҚК бір-бірін жұптарымен теңгеретін болады және байланыс желілерінде ток болмайды. Роторлардың мұндай орналасуы *келісілген* орналасу деп аталады.

Егер датчиктің роторын α_d және α_n бұрыштарының тепе-теңдігін бұза отырып бұратын болсақ, ЭҚК-ның бұрынғы тепе-теңдігі болмайды. Синхрондау орамалары мен байланыс желілерінде теңдеуші токтар пайда болады. Екі сельсиннің синхрондау орамаларының магнитті өрістерінің қоздыру орамаларының магнитті өрістерімен өзара

әрекет ету нәтижесінде сельсиндердің роторын олар қайта келісілген орында болатындай етіп бұруға тырысатын, айналып тұратын, *синхрондайтын иінкүштер* пайда болады. Егер сельсин-датчиктің роторын белгілі бір қалыпта ұстап тұрып, ал сельсин-қабылдағыштың роторына айналуға мүмкін беретін болса, ол бұрыштардың тепе-теңдігін қалпына келтіре отырып бұрылады.

Алайда датчикте берілген ад бұрылу бұрышын қабылдағыштың роторы *үйлесімсіздік бұрышы* деп аталатын кейбір қателікпен шығарады: $\theta = \alpha_d - \alpha_n$. Мойынтіректер мен жылжымалы түйіспелерде үйкелу күштеріне, ал жеке жағдайларда сельсин-қабылдағышқа түсетін пайдалы жүктемеге де негізделген қарсы әрекет ететін иінкүштерден өту қажеттілігі үйлесімсіздік себебі болып табылады.

Үйлесімсіздік бұрышын *түйіспесіз* сельсиндерді қолдана отырып азайтуға болады, оларда бұрын сипатталған *түйіспелі* сельсиндерге карағанда жылжымалы түйіспелер болмайды. Түйіспесіз сельсиндерде қоздыру және синхрондау орамалары статорға орнатылады, ал ротор электртехникалық болат табағынан жиналған магнитті емес материалдан (алюминийден) аралықпен екі полюске бөлінген цилиндр болып табылады. Магнитті емес аралық ротордың осі перпендикуляр емес, қиғаш орналасқан. Мұндай роторды айналдырған кезде ораманың қозғалмауына қарамастан кеңістікте қоздыру орамымен туындаған магнитті өрістің бағыты өзгереді. Түйіспелі сельсиндермен салыстырғанда бұрышты шығарудың неғұрлым жоғары дәлділігінен бөлек түйіспесіз сельсиндер жоғары сенімділікпен сипатталады.

10.5.

АСИНХРОНДЫ ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШ. ЖЕЛІЛІК АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ

Асинхронды жиілік түрлендіргіш (АЖТ). Фазалы роторы бар асинхронды қозғалтқыш болып табылады. Оның статорының орамасы f_1 жиіліктегі ауыспалы кернеудегі үш фазалы желіге қосылады. Ротордың орамасында бұл ретте ротордың айналу жиілігіне байланысты болатын f_2 жиілікпен ЭҚК пайда болады: $f_2 = sf_1$, мұнда s сырғу n_1 статордың магнитті өрісінің айналу жиілігімен және n_2 ротордың айналу жиілігімен анықталады: $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ((9.7) және (9.2) формулаларын қараңыз).

Көрсетілген формулаларды біріктіре отырып, асинхронды жиілік

түрлендіргішінің ЭҚК жиілігінің теңдігін жазып алайық:

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} f_1. \quad (10.6)$$

АЖТ-ның асинхронды қозғалтқыштан ерекшелігі:

- асинхронды қозғалтқышта ротордың орамасы қысқа немесе реттеуші немесе қосушы реостатқа тұйықталады, ал АЖТ-да ротор орамасының шықпалары осы түрлендіргіштің шықпалы қысқыштарына жалғанады;
- АЖТ роторы жетекті қозғалтқыштан айналады; осылайша, сырғу мәні, демек ЭҚК түрлендіргішінде индукциялайтын жиілік те n_2 жетекті қозғалтқышының айналу жиілігімен беріледі.

Жетекті қозғалтқыш ретінде тұрақты ток қозғалтқышын (шықпа кернеудің жиілігін бірқалыпты реттеу қажет болған кезде), сонымен қатар асинхронды немесе синхронды қозғалтқышты (белгілі бір жиілікті алу қажеттілігі туындаған кезде) пайдалануға болады.

Жетекті қозғалтқыш АЖТ статорының магнитті өрісінің айналу жағына, сондай-ақ карама-қарсы жакқа айналуы мүмкін. Бірінші жағдайда n_2 жетекті қозғалтқышының айналу жиілігі оң болады ($n_2 < n_1$ кезінде) және АЖТ f_2 шығыс кернеуінің жиілігі (10.6) теңдігіне сәйкес АЖТ-ға қуат беретін желінің f_1 кернеуінің жиілігінен кем болады. Екінші жағдайда жетекті қозғалтқышының айналу жиілігі оң болады, теріс болады және бұл ретте түрлендіргіштің шығуында кернеудің жиілігі қуат беруші кернеудің жиілігінен артық болады. Қарастырылған жағдайлардың біріншісінде АЖТ қозғалтқыш режимде, ал екіншісінде қосуға қарсы тежеу режимінде жұмыс істейді ((9.9) - бөлімін қараңыз).

Жиі жағдайда АЖТ 100 немесе 200 Гц жоғарылатылған жиілік алу үшін пайдаланылады (мұндай жиіліктер электр құралын қуат беру үшін бірқатар жағдайларда қажет). Асинхронды жиілік түрлендіргіш арқылы қалай 200 Гц жиілік алынатындығын көрсетейік.

Жетекті қозғалтқыштың айналу жиілігі 3 000 айн/мин тең болсын және ол АЖТ-ны түрлендіргіштің магнитті өрісі айналатын бағытқа карама-қарсы бағытта айналдырады дерлік, сондықтан $n_2 = -3\,000$ айн/мин қабылдау қажет. Жиілік түрлендіргіштің статоры орамасының полюстар жұптарының саны $p = 3$ болсын дерлік. Сонда, АЖТ желіден $f_1 = 50$ Гц кернеу жиілігімен қуат алған кезде оның статорының өрісі айналатын жиілік келесіні құрайды:

$$n_1 = 60 f_1 / p = 1\,000 \text{ айн/мин}$$

((8.4) формуласын қараңыз).

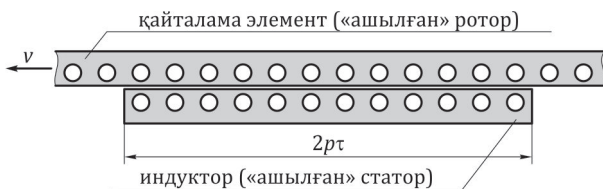
n_2 мәнін ескере отырып, n_1 және n_2 мәндерін (10.6) теңдігіне қоя отырып төмендегіні аламыз:

$$f_2 = 4f_1 = 200 \text{ Гц.}$$

Желілік асинхронды қозғалтқыш. Электр энергиясын үдемелі қозғалыс энергиясына түрлендіреді. Бұл ретте айналмалы қозғалысты үдемелі қозғалысқа айналдыру қажеттілігі жоқ, бұл қозғалысқа келтірілетін механизмнің конструкциясын жеңілдетеді және оның ПЭК коэффициентін арттырады. Желілік қозғалтқыштарды конвейерлерде, эскалаторларда, көтергіш механизмдерде, металл өңдеуші және тоқыма станоктарда, сонымен қатар көлікте сүйрегіш қозғалтқыш ретінде пайдалануға болады, бұл ретте 500 км/сағ-қа дейінгі қозғалу жылдамдығына қол жеткізуге болады.

Желілік асинхронды қозғалтқыштың жұмыс істеу қағидасын егер кәдімгі асинхронды қозғалтқыштың статоры мен роторын диаметр бойымен кесілген және ашылған күйде елестетін болсақ, жеңіл түсінуге болады. Егер статорды кесіп, ашатын және оның орамасымен үш фазалы токтар жүйесін өткізетін болсақ, туындаған магнитті өріс *айналмалы* емес, *жылжушы* болады. Мұндай «ашылған» статор индуктор деп аталады; ол *қайталама элемент* деп аталатын «ашылған» ротордың қысқа тұйықталған орамасында ЭҚК индукциялайды (10.6-сурет). Қайталама элементтің өзегінде индукцияланған ЭҚК әсерімен туындайтын магнитті токтар өрісі индуктордың жылжыту өрісімен әрекетке түседі, соның нәтижесінде желілік қозғалтқыштың жылжымалы бөлігін жылжымайтын бөлікке қатысты алғанда қозғалтуға тырысатын электромагнитті күштер пайда болады. Осылайша, желілік қозғалтқыштың жұмыс істеу қағидасының негізінде бұрын бірнеше рет аталған құбылыс жатыр: магнитті өрістік күштік желілерінен өткен кезде тогы бар сымдарға әсер ететін күштердің туындауы.

Кәдімгі асинхронды қозғалтқыш статоры шеңберінің ұзындығы секілді $l_{\text{н}}$ желілік қозғалтқышы индукторының ұзындығын $2p$ полюс



10.6.-сурет. Желілік асинхронды қозғалтқыштың сұлбалық бейнесі.

стар мен $l_{\text{и}} = 2\pi r$ сияқты τ полюстік бөлік қатарынан өрнектеуге болады. Индукторға қуат беретін синусоидалық кернеудің T_1 кезеңіне тең болатын уақыт ішінде жылжымалы өріс жақын тұрған бір аттас полюстар арасындағы қашықтықта тең болатын екі 2τ полюстік бөліктің қашықтығына қозғалады (8.2-бөлімнің соңын қараңыз). Сонда жылжымалы өрістің жылдамдығы

$$v_1 = 2\tau/T_1 = 2\tau f_1 \quad (10.7)$$

болды (10.7), өйткені кезең мен жиілік — өзара қарама-қарсы шамалар.

Статордың айналып тұрған өрісіндегі ротордың айналуы секілді индуктордың жылжымалы өрісіндегі қайталама элементтің үдемелі қозғалысы (9.2) өрнегіне ұқсас өрнекпен анықталатын біршама сырғумен жүреді:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1},$$

мұндағы v_2 — қайталама элементтің қозғалу жылдамдығы.

Желілік қозғалтқыштың номиналды сырғуы 2...6%-ды құрайды.

Желілік қозғалтқыштың әртүрлі конструкцияларында қайталама элемент, сонымен қатар индуктор жылжымалы бөлік болып табылады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Индукциялық реттегіш пен фаза реттегіштің функциялары мен жұмыс істеу қағидалары қандай? Осы құралдардың қандай ерекшеліктері бар?
2. Қандай жағдайда бір фазалы асинхронды қозғалтқыш айнала бастайды? Егер статордың магнитті өрісі айналмалы емес өтіп тұрған болатын болса, ротордың айналу мүмкіндігін түсіндіріңіз.
3. Бір фазалы асинхронды қозғалтқыш қалайша іске қосылады? Қандай қозғалтқыш конденсаторлық деп аталады?
4. Атқарушы асинхронды қозғалтқыштың екі орамасының әрқайсысы қандай функциялар орындайды?
5. Атқарушы қозғалтқыштың механикалық сипаттамаларының ерекшеліктері қандай; осы ерекшеліктерге ненің есебінен қол жеткізіледі және олар қозғалтқыштың қасиеттеріне қалайша әсер етеді?
6. «Электрлік білік» терминінің мағынасын түсіндіріңіз. «Электрлік білік» жүйесінің жұмыс істеу қағидасы қандай?
7. Сельсиндердің нысаналы мақсаты мен жұмыс істеу қағидасын сипаттап беріңіз.

СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАР

11.1. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАР КОНСТРУКЦИЯСЫНЫҢ ЖАЛПЫ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ ЖӘНЕ ЖҰМЫС ІСТЕУ ҚАҒИДАСЫ

Синхронды генераторлардың жалпы ерекшеліктері. Айнымалы токтың көздері болып табылатын синхронды генераторлар әлемде айнымалы токтың маңызды артықшылықтары түрінде электр энергиясының басым бөлігін құрайды. Біріншіден, айнымалы ток аз шығындармен де жеңіл тасымалданады – үлкен арақашықтыққа электр энергиясын беруге қажетті жоғары қысымға, сондай-ақ электр энергия қабылдағыштарын қуат беруға қажетті төмен қысымға түзіледі. Екіншіден, айнымалы токтың генераторлары тұрақты токтың генераторларына қарағанда өте қарапайым қондырғы, жұмыста сенімді және пайдалануға қарапайым болып келеді. Аталған артықшылықтар, әсіресе үш фазалы синхронды генераторларды қолданған кезде байқалады. Тұрақты ток қажет етілген жағдайда (оның ішінде, электрохимиялық өндіріс, көлік және байланыс) оны ең алдымен, айнымалы токты түзету көмегімен алады.

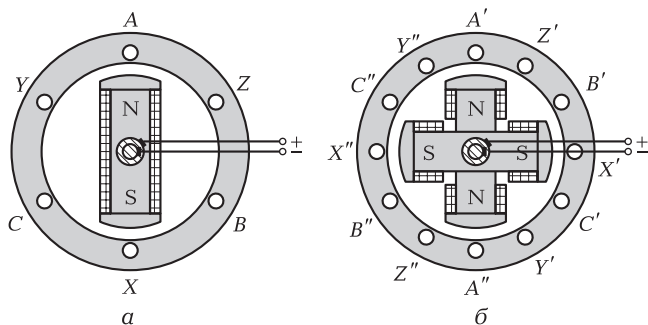
Қазіргі уақытта электр энергиясының тұрақты ток түріндегі таралуы көп орын алғанын айта кетуге болады. Тұрақты токтың жеткізілуі кезінде, айнымалы ток берілгенде орын алатын кабельдердің оқшауланудың ескірудің кейбір механизмдері болмайды; қуатты ағын реверсінің мүмкіндігі және үлкен қуаттардың ауысуы болады; тұрақты токтың электр тарату жүйесінің (ЭТЖ / ЛЭП) аз шығындарымен де тұрақты жұмыс істейді; электростанция жұмыстарының синхрондануына қажеттілік туындайды. Алайда, бұл жағдайда, желінің бір ұшында болатын кейін тұрақты кернеуге ауысатын тұрақты емес, айнымалы кернеу өндіріледі және тасымалданады, ал соңында қайтадан басқа айнымалы кернеу түзіледі.

Үш фазалы синхронды генераторлардың атқаратын құрылымдары әр түрлі. Құрылымның нақты түрі көп жағдайда бастапқы қозғалтқыштың қасиетіне тәуелді, ол генератор толқындарының айналуына алып келеді (оның ішінде, оның айналуының жиіліктеріне).

Соған қарамастан, бұл машиналардың негізгі бөліктерінің жалпы констукциясы мен тағайындалуы бірдей. Кез келген синхронды генератордың негізгі бөліктеріне ЭҚК (мұндай белгілеудің орамасы *зәкірлі* деп аталады) алуға арналған орамасы бар жылжымайтын статор және тұрақты кернеудің қандай да бір көзі арқылы қуат алатын қоздырғыш орамасы бар ротор болып табылады. Мұндай көздің қажеттілігі осындай машиналар түрлерінің кемшілігі болып саналады, бірақ қызу тізбегі тұтынатын қуат генератормен өндірілетін қуаттан бар болғаны 0,3...3,0% қуатты құрайды (синхронды генераторлардың қоздыру тәсілдері, яғни қоздыру орамасын қуат беру әдісі 11,7 - бөлімде қарастырылған).

Синхронды және асинхронды машиналардың статорлары ұқсас құрылымды және олардың орамаларының қондырғылары да ұқсас (8.2 - бөлімін қараңыз). Статор диаметрі 1 м-ден асқанда ол дестеленген өзекшенің әр сақиналы қабаты жеке тілімшелер – сегменттерден тұрады. Көрсетілген түрлердің басты айырмашылығы роторға қатысты. Синхронды генераторда және синхронды қозғалтқышта ротор электромагнит болып табылады, оған қоса оның полюстерінің саны екіге тең болады, кейде бірнеше ондықтарға тең болуы мүмкін. (тіпті 108-ге дейін).

11.1 *а* - суретте сызбанұсқа түрінде үш фазалы синхронды машина бейнеленген, оның роторы екі полюстен тұрады (полюстер жұбының саны $p = 1$). Ротор орамасы (қоздыру орамасы) дөңгелектердің жылжымалы байланыстары және щетка көмегімен тұрақты ток арқылы жүзеге асырылады. Статордың қарапайым үш фазалы орамасы – бірқабатты шоғырландырылған, кеңістікте біреуі екіншісі-



11.1.-сурет. Үшфазалы синхронды машинаның сызбанұсқалық бейнесі:
а — екі полюсімен; *б* — төрт полюспен.

не 120° бұрышқа жылжытылған үш AX , BY , CZ шарғысы бар (11.1 суретте сызба жазықтығына перпендикуляр орналасқан шарғының белсенді жақтары ғана көрсетілген (8.3, a суретімен салыстыру)).

11.1 b - суретте бейнеленген машина төрт полюсі бар ротордан тұрады ($p = 2$). Бұл жағдайда статордың бірқабатты шоғырландырылған орамасы алты шарғыдан тұрады – фазаға екі тізбектей қосылған шарғыдан: $A'X'$ және $A''X''$ (8.3, b суретімен салыстырыңыз); $B'Y'$ және $B''Y''$; $C'Z'$ және $C''Z''$. Әр түрлі фазаларға жататын жақын шарғылар арасындағы орталық бұрыш $60^\circ = 120$ эл. град. құрайды ((10.3) өрнегін қараңыз), ол $A'X'$ және $B'Y'$ шарғылары арасындағы бұрышы секілді болып келеді.

Синхронды генератордың жұмыс істеу қағидасы. Қоздыру орамасында тұрақты ток өтіп ротор айналасында магниттік өріс құрылады, оның конфигурациясы полюстер санына тәуелді болады. Бастапқы қозғалтқыштың n жиілігімен ротор айналғанда бұл өріс ротормен бірге айналады. Ротор өрісінің күш сызықтары статордың орам өткізгіштерімен қиылысады, онда ауыспалы ЭҚК жасалады. Статор орамасының әр фазасында ЭҚК лездік мәнінің өзгеруінің толық кезеңі екі полюсті бөліктерге, яғни *аттас* полюстердің орталықтары арасындағы арақашықтыққа сәйкес келетін бұрышқа ротордың айналым уақыты кезінде өтеді. (бұл бұрыш $360^\circ/p = 360$ эл. град. тен).

Егер $p = 1$ болса, ротордың бір айналымы кезінде ЭҚК өзгерісінің бір кезеңі жүрсе, сонда 1 эл. град. $= 1^\circ$ болады. Мұнымен қоса, герцпен өрнектелген статор орамасының әр фазасының ЭҚК жиілігі $f = n/60$ болады, мұнда n ротордың айналым жиілігі минутына жасалатын айналыммен өрнектелген.

Егер $p > 1$ болса, онда ротордың бір айналымы кезінде ЭҚК өзгерісінің p кезеңі жүреді, сол кезде

$$f = \frac{pn}{60} \quad (11.1)$$

((8.4) өрнегімен салыстырыңыз).

Фазалардың кеңістіктік жылжуының салдарынан олардың ЭҚК статор орамдары уақыт бойынша бірі екіншісіне ЭҚК $1/3 T$ мерзіміне салыстырмалы түрде жылжыған, бұл фаза бойынша $2\pi/3$ рад жылжыған. ЭҚК синусоидалдық сипат болжамдарында, олардың лездік мәндері мына өрнектермен сипатталады:

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad e_C = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \quad (11.2)$$

Мұнда бұрыштық жиілік $\omega = 2\pi f$.

Синусоидалдыға жақын келетін ЭҚК іс жүзінде, қысқартылған кадаммен таратылған ораманың жағдайында ғана алынады (8.2 бөлімін қараңыз).

Егер генератор шықпасына үш фазалы симметриялы жүктеме қосылған болса, онда осы жүктеменің жеке бөліктерінде (фазаларында) (8.1) өрнектерімен анықталатын токтармен өтетін болады (бірақ, жалпы жағдайда ток өрнектеріндегі синус аргументтері көп жағдайда жүктеме сипатымен анықталатын ψ_0 -ға қосылатын ЭҚК өрнектеріндегі синус аргументтерінен ерекшеленеді). Токтардың лездік мәндерінің уақыты бойынша статор орамасына тәуелділігі (немесе үш фазалы жүктеменің фазалары) 8.1, *a* суретінде көрсетілген.

8.1 - бөлімінде статор орамалары бойынша өтетін токтардың үш фазалы жүйесі айналмалы магниттік өріс туғызатыны анықталды, оның айналым жиілігі (8.4) өрнегіне сәйкес ток жиілігімен және полюстер жұбының санымен анықталады. Мынадай тұжырымға келеміз, *синхронды генератор статорының магниттік өрісінің айналым жиілігі оның роторының айналым жиілігіне тең, яғни, статор мен ротор өрістері біріне бірі салыстырмалы қозғалыссыз болады*. Бұл айналымның жалпы жиілігі *n синхронды жиілік* деп аталады.

Егер синхронды генератордың статорында 11.1 суретінде *AX* шарғысымен, немесе 11.1 суретінде тізбектелген *A'X'* және *A''X''* біріккен шарғыларымен көрсетілгендей бір фазалы орамасы бар болса, онда генератор *бір фазалы синхронды* деп аталады. Мұнда ротор полюсінің бұрыңғы саны қалады. ЭҚК жиілік өрнегі f (11.1) және ЭҚК лездік мәнінің өрнегі e_A (11.2) дұрыс болып қалады.

Синхронды генератор мен тұрақты ток генератор жұмысының негізінде сол құбылыстар бар (1.1 бөлімін қараңыз). Аталған екі машинаның негізгі айырмашылығы мынада, яғни тұрақты ток генераторының констукциясында жүктемеде ток бағытының тұрақтылығын қамтамасыз ететін қондырғы – коллектор қарастырылған, ал синхронды генераторда коллектор жоқ.

Басқа құрылымдық айырмашылық болып, машинаның айналмалы және қолғалмайтын бөліктерінің басқа тағайындалуы жатады: тұрақты ток машинасында қоздыру орамасы статор полюстерінде орналасқан, ал зәкір орамасы – роторда. Керісінше, барлық қуатты синхронды генераторларда зәкір орамасы статорда орналасқан, бұл жоғары қуаты мен кернеуі бар жүктеме тізбегінің сырғымалы байланыстарын қолдану қажеттілігін жояды. Зәкір тізбегіндегі сырғымалы байланыстардың болуы доға тәрізділікпен байланысты үлкен

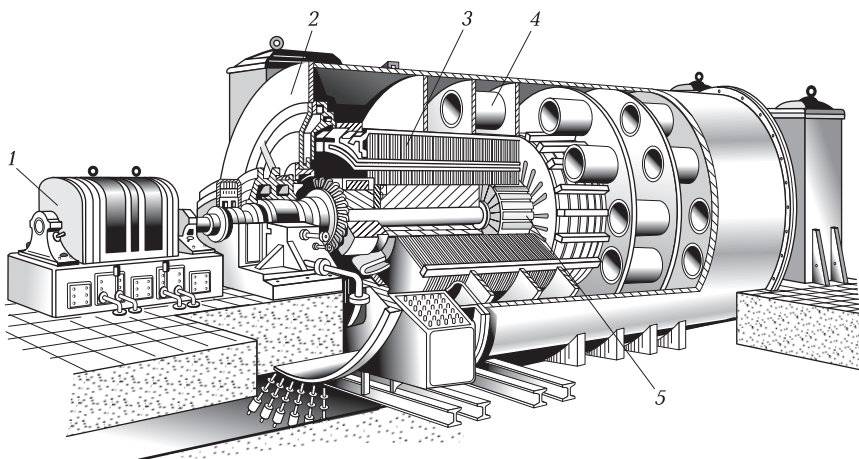
қиындықтарға алып келеді. Синхронды машинаның қоздыру тізбегіндегі сақиналар мен щеткалар мұндай қиындықтарға алып келмейді, себебі бұл тізбектің қуаты мен кернеуі біршама төмен.

11.2. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАР ТҮРЛЕРІ

Турбогенератор. Турбогенератордың бастапқы қозғалтқышына турбина қалағына бағытталған жоғары қысымның бу немесе газ әсерімен айналатын жылу (ЖЭС) немесе атом электр станцияларының (АЭС) булы немесе газды турбинасы саналады. Турбогенератор білігі көлденең орналасқан және турбинаға тікелей біріккен. Қимадағы турбогенератор 11.2 суретте көрсетілген.

Қуаттылығына байланысты турбогенераторлар келесі негізгі топтарға жіктеледі: қуаты 25 — 63 МВт; 100 — 200 МВт; 300 — 500 МВт; 800 МВт; 1000 МВт-тан аса. Сонымен, Костромск ГРЭС-інде «Электросила» (Санкт-Петербург) зауытында әзірленген қуаты 1200 МВт болатын ТВВ-1200-2 турбогенераторы пайдаланылады (статор кернеуі 24 кВ, қоздыру кернеуі 517 В).

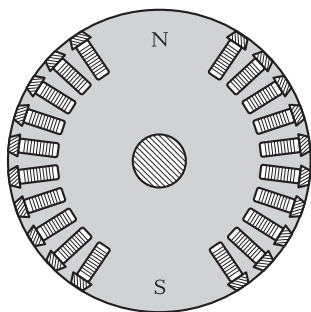
Айналым жиілігі бойынша турбогенераторларды төрт полюсті (1500 айн/мин. айналым жиілігімен) және екі полюсті (3000 айн/мин айналым жиілігімен). Қазіргі уақытта, сонымен бірге, жиілігі 100 Гц



11.2.-сурет. Турбогенератор:

1 — қоздырғыш (синхронды генератордың қоздыру орамасын қуат беретін тұрақты ток генераторы); 2 — корпус; 3 — статор өзегі; 4 — сутекті салқындату бөліктері; 5 — ротор

11.3.-сурет. Айқын көрсетілмеген полюстері бар ротордың көлденең қимасы.

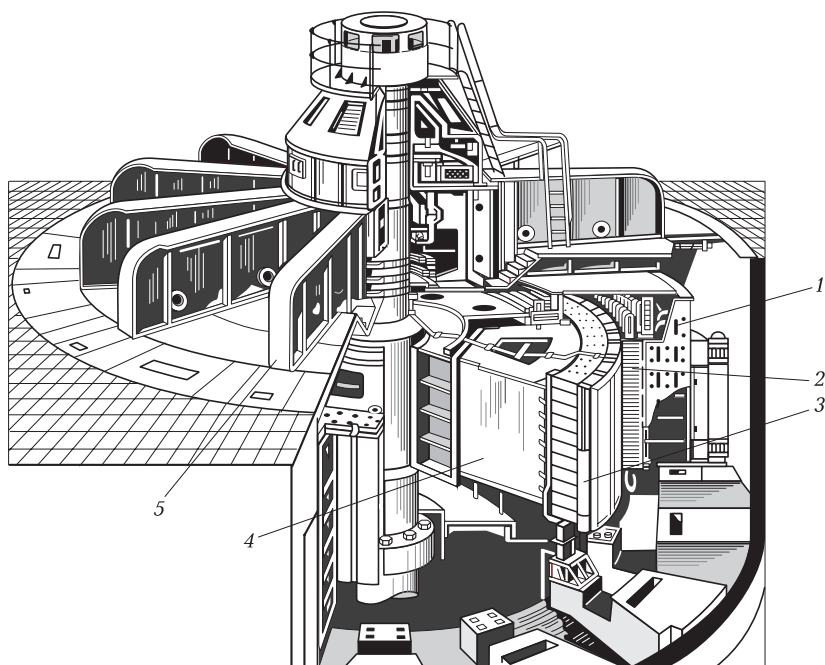


ЭҚК өндіретін 6000 айн/мин айналым жиілігі бар турбогенераторлар өндіріліп жатыр (бұл жағдайда генератор мен желі арасында жиілікті 50 Гц-ке дейін төмендететін жиілік түрлендіргіші орнатылады).

Турбогенераторлардың роторларын айқын емес полюсті етіп жасайды, яғни айқын көрсетілмеген полюстерімен (11.3 сурет). Мұндай ротор біршама үлкен дәрежеде айқын полюсті роторға қарағанда жоғарғы жиілік кезінде механикалық төзімділік талаптарына жауап береді (11.1-суретін қараңыз). Қуатты турбогенераторлардың роторларын жоғары сапалы хромникельді немесе хромникельмолибденді болаттан әзірлейді. 3000 айн/мин айналым жиілігі кезінде қажетті механикалық төзімділікті қамтамасыз ету үшін ротор диаметрі 1,25 м-ден аспау керек, ал механикалық қаттылықты қамтамасыз ету үшін ротордың белсенді ұзындығы 6 м-ден көп болмау керек. Тікбұрышты саңылаулар ротор бетінде фрезерлеумен орындалады. Саңылауларда орнатылған қоздыру орамаларының шарғылары магнитті емес металдан (алюминийден) жасалған сыналармен бекітіледі. Магнитті емес сыналар ойықтар аймағында пайда болған сейілтудің магниттік ағындары әлсірейді. Сейілту ағындары ротор тістерінің магниттік қанықтығын тудырады, бұл пайдалы магнитті ағынның азаюына алып келеді.

Ротор біліктері мойынтіректі қалқандарда орнатылған мойынтіректерде жиналады. Қазіргі уақытта жоғары жиілікті айналымы бар генераторларға (6 000 айн/мин) дірілдің өте төмен деңгейін қамтамасыз ететін және жақпаны талап етпейтін *магнитті мойынтіректер* қолданылады (үйкелетін бөліктері болмайды).

Тік білігі бар гидрогенератор. Синхронды гидрогенератордың бастапқы қозғалтқышы құлама су ағынының әсерімен айналатын гидроэлектрстанциялар (ГЭС) немесе гидроаккумуляторлы электрстанциялардың (ГАЭС) гидравликалық турбинасы саналады. Гидрогенератор білігі тік орналасқан және тікелей гидравликалық турби-



11.4.-сурет. Аспалы тұрпатты гидрогенератор:

1 — статор корпусы; 2 — статор өзегі; 3 — ротор полюсі; 4 — ротор тогы; 5 — жоғарғы тіреу айкастырмасы.

намен біріккен. Қимадағы гидрогенератор 11.4 суретте көрсетілген.

Гидрогенераторлар жай жүретін машиналар болып табылады. Гидравликалық турбинаның айналым жиілігі және, яғни гидрогенератордың роторы су қысымы мен турбина қуатына байланысты.

Сонымен, мысалы СВ-712/227-24 гидрогенераторды айналдыратын турбина (сыртқы диаметрі 712 см және статордың белсенді болат ұзындығы 227 см болатын синхронды тік генератор), 250 айн/мин жасайды, ал генератордың айналым жиілігі бар болғаны 62,5 айн/мин (шамамен секундына бар айналым) құрайды. Барлық отандық гидрогенераторлар 50 Гц жиілікпен электроэнергиясын өндіреді. (11.1) формуласына сәйкес бұл бірінші генератордың полюс жұптарының санын білдіреді. Мысал ретінде келтіріледі, ол мынаған тең

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12 \quad (\text{яғни оның полюстерінің саны})$$

24 тең, оған генератор тұрпатты әріптік-сандық белгісіндегі соңғы

саны), яғни екінші генератордың полюстер жұбының саны 48 тең (96 полюстер). Гидрогенератор полюстерінің минималды саны 8, максималды саны — 108. Гидрогенераторлар полюстері айқын көрсетілген; 4 сақиналық тоғынына бекітіледі (11.4 суретін қараңыз), ол бір уақытта айқын магнитті жүйе, ол арқылы полюстердің магнитті ағындары тұйықталады.

Гидрогенераторлар статорларының өлшемдері үлкен болуына байланысты, оларды жалғау арқылы орындайды — ол көбінесе алты бірдей бөліктерден тұрады.

Білігі тік орналасқан гидрогенератордың айналмалы бөлігінің салмағы, сонымен қатар су қысымы турбинаның қолданыстағы дөңгелегіне өкшелік арқылы қабылданады. Өкшелік сырғымалы мойынтіректен құралады, ол айналмалы бөлік — табаннан тұрады, ол роторға бекітілген диск түрінде орындалған және табан астында орналасқан жылжымайтын бөлігі бар. Өкшеліктің жылжымалы және жылжымайтын бөліктері арасында жақпа қабаты бар. Қуатты генератор өкшелік жүктемесі бірнеше мың тоннаны құрайды.

Ротордың білігіне қатысты өкшеліктің орналасуы бойынша тік генераторлар аспалы және шатыр тұрпатты болады.

Аспалы тұрпатты генераторда өкшелік ротор білігінен жоғары тіреулі айқастырмада орналасқан 5 (11.4 суретті қараңыз). Мұнымен қоса, айналмалы ротордың шамалы механикалық тұрақтылығына жетеді, бірақ өкшеліктің тіреуі үшін үлкен айқастырма керек. Негізінде, аспалы тұрпатты гидрогенераторлар салыстырмалы үлкен айналмалы жылдамдығы болады, сондай-ақ ротор мен статордың шектелген диаметрі бар.

Шатыр тұрпатты генераторда өкшелік ротор өзегінен төмен, төменгі айқастырмада орналасқан. Бұл құрылым ротор мен статор диаметрі үлкен жай жүретін генераторлар үшін өте ыңғайлы.

Өкшеліктерден басқа гидрогенераторлар білігіне тек қана радиалды күштерді қабылдайтын бір немесе екі бағыттаушы мойынтіректерді орнатады.

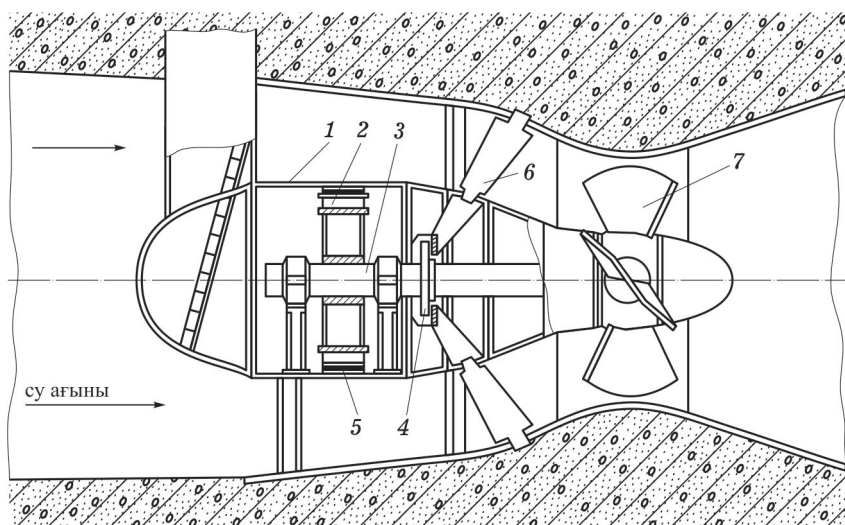
Ең қуатты гидрогенераторлар Енисей өзенінде орналасқан Сян-Шушенск ГЭС-де жұмыс жасайды. Олардың әрқайсысының қуаты 715 МВ·А құрайды, айналым жиілігі 143 айн/мин ($2p = 42$ полюс), сыртқы диаметрі 15 м, ротор диаметрі 12 м, статордың магнит желісінің ұзындығы 2,75 м.

Ең қуатты гидрогенератор Еуропада Украинада «Электро-тяж-маш» харьков зауытында (қуаты 421 МВт) құрастырылған.

Машина Днестр ГЭС-не арналған және ол электр желілеріндегі кернеудің төмендеуімен байланысты қиындықтарды шешуге негізделген. Алдыңғы мысалмен салыстырғанда көрінгендей, харьков машинасының қуаты гидрогенераторлар үшін аса маңызды болып табылмайды, бірақ оның ерекшелігі екі режимде жұмыс істеп, тағайындалуына негізделген: генераторлы және қозғалтқышты. (Гидрогенератор қозғалтқышты режимге энергия жүйесінің жүктемесі аз кезінде өтеді; желіден қуатты тұтына отырып, мұндай агрегаттар құбыр желісі бойымен суды электростанцияның төменгі бассейнінен жоғарғысына айдайды.)

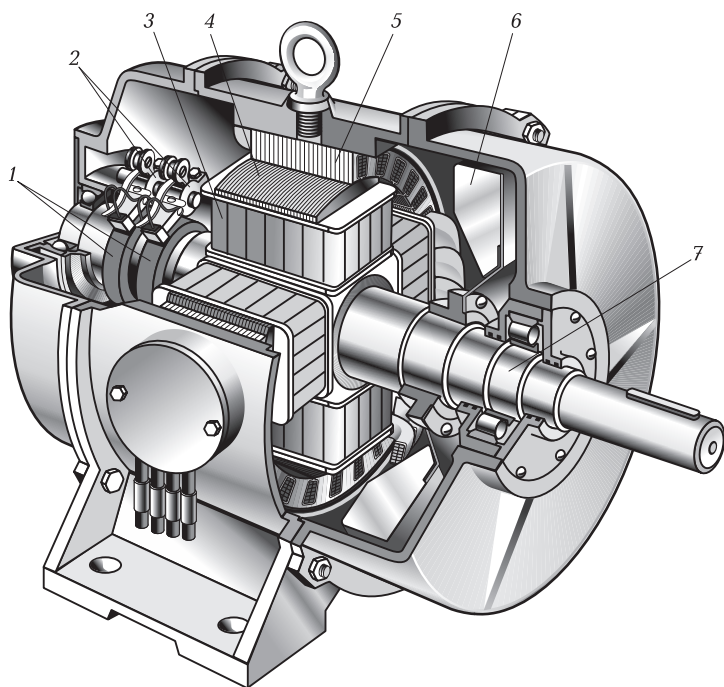
Капсулалы гидрогенератор. Су өткізбейтін капсула 1 ішінде тікелей су ағынымен жүреді (11.5 сурет). Білік 3 көлденең орналасқан. Өкшелік 2 осьтік жүктемені су ағынының энергиясын механикалық айналдыратын турбинаның 7 қолданыстағы дөңгелегінен қабылдайды. Су қолданыстағы дөңгелегіне гидравликалық турбинаның бағыттаушы құрылғысы – 6 турбинаның қолданыстағы құралы арқылы келіп түседі, ол су ағынының ширатуын өзгертетін және күректердің бұру есебінен су шығынын реттейтін құрал. Капсулалы генератордың роторы 4 айқын полюсті орындалады.

Капсулалы генераторлар төмен қысымды гидростанцияларда



11.5.-сурет. Капсулалы гидрогенератор:

1 — капсула; 2 — өкшелік; 3 — білік; 4 — ротор; 5 — статор; 6 — турбинаның бағыттаушы құрылғысы; 7 — турбинаның қолданыстағы дөңгелегі.



11.6.-сурет. Дизель генераторы:

1 — байланыс сақиналары; 2 — щетка ұстағыштар; 3 — полюсті шарғы; 4 — полюсті ұштық; 5 — статор өзегі; 6 — желдеткіш; 7 — білік

қолданылады және машиналы залдан бас тартуына мүмкіндік береді және жинақылық пен станцияның арзандығына жетуге мүмкіндік береді. Капсулалы генераторлар бірнеше он мыңдаған мегаваттарға дейінгі қуатта дайындалады.

Дизель-генератор (11.6 сурет). Бұл генератордың қуаты аз (1...2 МВт-қа дейін), іштен жану қозғалтқышымен біріккен. Біліктің орналасуы көлденең. Қоздырғыш (яғни, синхронды генератор қоздыруының орауышын қуат беретін тұрақты ток генераторы) дизель-генераторының фланеціне бекітілуі және ортақ білігі болуы мүмкін. Бұл тұрпатты генераторлар 600–1500 айн/мин айналым жиілігіне есептеледі, осылай, айқын көрініп орындалатын полюстің бестен екі жұбына дейін болады. Аз ғана қуатқа ие бола отырып, дизель-генераторында өлшемдері үлкен емес роторларға ие, сондықтан да болар болмас 1500 айн/мин айналым жиілігінде айқын полюсті ротор төзімділіктің талаптарын қанағаттандырады. Дизель-генераторлар

жылжымалы және кіші стационарлы электростанцияларда қолданылады.

Кемені электрмен жабдықтауға арналған ДГМ-200/1500 суасты дизель-генераторының қуаты 200 кВт және қима өлшем 1,2 м. тепловоздарда орнатылатын 1А-9ДГ дизель-генераторының қуаты 2,2 МВт және оның қима өлшемі шамамен 2 м.

11.3. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОР ЗӘКІРІНІҢ ӘСЕРІ

Синхронды генератор зәкірінің әсері туралы ұғым. Генераторды бос жүргізген кезде, яғни ток зәкірлі орауда болмаған жағдайда, (статор орауында) статор мен ротор өзектерінде, сонымен қатар әуе саңылауында қоздыру орамасының магнит қозғаушы күшімен $F_{\text{в}}$ пайда болған тек *негізгі магнитті ағын* $\Phi_{\text{в}}$ ғана болады (магнитті қозғаушы күші туралы ұғым 1.6 бөлімінде айтылады).

Генератор жүктемені қуат бергенде, зәкір орауы бойынша ток өтеді, онымен зәкірдің МҚК $F_{\text{а}}$ байланысты. Бұл МҚК фаза бойынша МҚК-ға сәйкес келетін зәкірдің магнитті ағынын $\Phi_{\text{а}}$ құрады.

Е с к е р т у. Бұрын электр машинасының зәкіріне жататын шамалар белгілерінде орыс тілінің «я» индексі пайдаланылған. МҚК, магнитті ағын және синхронды машинаның зәкір кедергілері белгілерінде дәстүрлі түрде латын индексі «а» (armature— зәкір) қолданылатын болады.

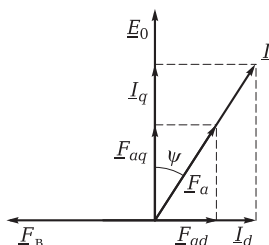
Негізгі магнитті ағын $\Phi_{\text{в}}$ зәкір ағынымен бірге $\Phi_{\text{а}}$ *қорытқы магнитті ағын* Φ түзеді.

Зәкір МҚК-ың қорытқы магнитті ағынға әсері *зәкір әсері* деп аталады. (тұрақты ток машиналарына қарай зәкір әсері 1.6 бөлімінде талқыланған) тұрақты ток машинасы және синхронды машинада зәкір әсері зәкір тогының мәндеріне, генератор параметрлеріне, статор мен ротор өзектерінің қанығу дәрежесіне тәуелді болады. Айнымалы ток машинасының ерекшелігіне зәкір әсерінің жүктеме сипатына тәуелділігі жатады (белсенді, индуктивті, сыйымдылықты немесе аралас).

Зәкір әсерін зерттеу кезінде синхронды машинада *екі реакцияның* теориясын қолданған ыңғайлы, онда статор (зәкір) орамасымен құрылған ағын *бойлық және көлденең* ағындардан тұратынын көрсетеді: бойлық ағын полюстер осі бойымен бағытталған, яғни негізгі ағын бағытында немесе осы бағытқа қарсы бағытта, ал көлденең ағын бойлықпен салыстырғанда 90 эл.град-қа бұрылған.

Белсенді-индуктивті жүктеме кезіндегі зәкір әсері. Генератор-

11.7.-сурет. Белсенді-индуктивті жүктеме кезіндегі синхронды генератордың токтары мен МҚК векторлық диаграммасы.



дың белсенді-индуктивті жүктемесінде осы МҚК тудыратын магнит қозғаушы күштер мен токтардың векторлық диаграммасы 11.7 суретінде көрсетілген. ЭҚК генераторының векторы бос жүріс режимінде E_0 қоздыру орамасының МҚК F_b векторына салыстырмалы түрде қалыс жағына 90° -қа бұрылған (индукция ЭҚК-і фаза бойынша оның құрылған ағынынан 90° -қа қалыс қалған; (4.3) өрнектерін қараңыз).

Көрсетілген жүктеме сипатында жүктеме тогы I (зәкір тогы) фаза бойынша кернеуден генератор шығысында U кейбір φ бұрышына қалыс қалған (U векторы және φ бұрышы диаграммада көрсетілмеген). U генератор кернеуі мен E_0 ЭҚК арасындағы фазалар айырмасы көп емес және I тогы ЭҚК E_0 -дан қалады. ψ бұрышының сәйкес қозғалыс бұрышы диаграммада келтірілген.

I зәкір тогын фаза бойынша сәйкес келетін F_a зәкірінің магнитті қозғалыс күші анықтайды. МҚК векторы F_b қоздыру орамасына бағытталған оське I ток векторы проекциялай отырып, реактивті құрамдас зәкір тогын – *бойлық токты* аламыз:

$$I_d = I \sin \psi. \quad (11.3)$$

Бұл ток МҚК сипаттайтын зәкірдің бойлық реакциясын қоздырады:

$$F_{ad} = F_a \sin \psi. \quad (11.4)$$

Көрініп тұрғандай, F_{ad} веткоруы F_b векторына қарама-қарсы бағытталған. Осылай, *зәкірдің бойлық реакциясы белсенді-индуктивті жүктемеде машинаға магнитсіздендіру әсерін береді* (магнит ағынын төмендетеді).

Көлденең тогы (зәкірдің белсенді құрамдас тогы)

$$I_q = I \cos \psi \quad (11.5)$$

Магнитті қозғалыс күшін сипаттайтын зәкірдің көлденең реакциясын қоздырады

$$F_{aq} = F_a \cos \psi. \quad (11.6)$$

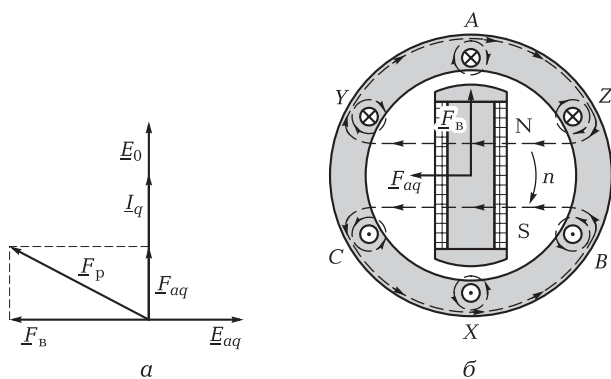
Машинаның қорытқы МҚК-сі F_b және F_a векторларының қосындысымен алынады. Қорытқы МҚК бағытында қорытқы магнит ағыны да бағытталады.

Айқын полюсті машинада көлденең және бойлық ағындар әр түрлі магнитті кедергілер арқылы өтеді; бойлық ағын аз кедергіге ұшырайды. Шынымен де, машинаның бойлық осі жанында әуе саңылауы (полюстің ұшы мен статордың ішкі беті) көлденең ось бағытына қарағанда айтарлықтай аз. Бұл жағдай сәйкесінше k_d және k_q *зәкір реакциясының коэффициенттерімен* ескеріледі. Сонда бойлық және көлденең осьтері бойынша зәкір реакциясының МҚК есептеу шамалары (сәйкес F'_{ad} және F'_{aq}) мынаған тең:

$$F'_{ad} = k_d F_a = k_d F_a \sin \psi; F'_{aq} = k_q F_a = k_q F_a \cos \psi. \quad (11.7)$$

Айқын емес машинада магнитті кедергі екі ось бойынша бірдей. Бұл жағдайда зәкір реакциясына коэффициенттерді енгізудің қажеті жоқ.

Белсенді жүктеме кезіндегі зәкір реакциясы. Жүктеменің белсенді сипатында зәкір тогы I фаза бойынша генератор шығысында кедергімен U сәйкес келеді. E_0 генераторының U және ЭҚК кернеуі арасында нөлдік фазалар айырмасы бар екеніне қарамастан ыңғайлы болуы үшін фаза бойынша ЭҚК E_0 кезіндегі емес, $\psi = 0$ болғандағы жағдайды қарастырамыз. Бұл жағдайда зәкір тогы *көлденең* болып саналады: $I = I_q$ (11.8 суреті, *а*). Көлденең деп зәкірдің магниттік ағыны да саналады. F_{aq} тең болатын F_a зәкір МҚК фаза бойынша ЭҚС E_0 сәйкес келеді және F_b қоздыру орамасының МҚК-нан 90° бұрышқа қалып қалады. Қарастырылып отырған векторлық диаграммаға екі полюсті машинаның 11.8, *б* суреті сәйкес келеді, мұнда шамалар арасындағы фазалар қозғалысының бұрыштары кеңістіктегі векторлар арасындағы геометриялық бұрыштарға тең. Қоздыру орамасының МҚК векторы



11.8.-сурет. Белсенді жүктеме кезіндегі синхронды генератордың МҚК векторлары:

а — векторлы диаграммада; *б* — кеңістікте.

ротордың магнитті өрісінің орта сызығында орналасқан. Ротор ішінде бұл вектор ротордың магнитті өрісінің күш сызықтары секілді оңтүстіктен солтүстік полюске бағытталған. Ротор сағат тілі бойымен бастапқы қозғалтқышпен айналады. F_v қоздыру орамасының F_{aq} зәкір МҚК-ы фаза бойынша 90° бұрышқа қалып қойса, онда F_{aq} векторы кеңістіктегі кез келген бағыт алдымен F_v векторын, содан барып айналым кезеңінің бір тоқсанынан кейін F_{aq} векторына келетіндей етіліп F_v векторына 90° бұрышпен кеңістікте орналасуы керек (11.8, б суретін қараңыз). (бір вектордың кеңістіктегі қозғалу бағыты басқасына қарағанда ротор айналымының бағытына тәуелді, ал векторлық диаграммадағы қозғалу бағыты шартты ережемен анықталады: қалыс қалған вектор озып кеткенге қарағанда сағат тілі бойынша қозғалған болып бейнеленеді).

11.8, б суретінде көрсетілген F_{aq} векторының бағыты сол суретте көрсетілген статордың белсенді өткізгіштеріндегі ток бағыттарымен қол бұрғы ережесімен байланысты. Қарастырылып отырған уақыт кезінде максималды ток AX шарғысы бойымен өтеді.

Сонымен, генератордың белсенді жүктеме жағдайында ротор полюстері өз айналымында статор орамасының белсенді өткізгіштер жағына бағытталған, онда дәл сол уақытта токтың лездік мәні максималды болады.

11.8, б суретінде статордың жеке белсенді өткізгіштерімен құрылған магнитті өрістерінің күш сызықтары, сонымен қатар, бір бағыттағы токтарға жататын сомалы өріс те көрсетілген. Ротордың магнитті өрісіне арақатынасы бойынша суреттің жоғарғы бөлігіндегі зәкірдің магнитті өрісіндегі күш сызықтардың бағыттарын қарастырамыз. Полюстің оң жақ шетінде зәкірдің өрістің күш сызықтары төмен қарай бағытталған, яғни ротор өрісіне карама-қарсы (негізгі магниті өрісіне). Полюстің сол жақ шетінде зәкір өрісінің сызықтары жоғарыға бағытталған, яғни негізгі өрістің бағыты бойынша. Осылай, зәкірдің көлденең өрісі генератор қорытқы өрісінің полюстің бір шетімен күшеюіне және полюстің басқа шетімен қорытқы өрістің әлсіреуіне алып келеді (1.6 бөлімінің талқылауларымен). E_p қорытқы МҚК векторы 11.8, а суретінде көрсетілген. Көлденең реакция қорытқы МҚК-ң (және қорытқы ағынының) шамасы мен фазасын өзгертеді. Ал бұл статордың ЭҚК мәніне әсер етеді, оған қоса зәкірдің көлденең реакциясының ЭҚК-ға әсерінің нәтижесі машинаның магнитті тізбегінің қанығу дәрежесіне тәуелді.

Қанықпаған магнитті тізбекте ағын мен ЭҚК қорытқы МҚК-ға пропорционалды түрде өзгереді. ЭҚК шамасын шамасы векторлық теңдеуді анықтайды

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{aq}, \quad (11.8)$$

және ЭҚК бос жүріске қарағанда көбірек болып шығады. (зәкірдің көлденең ағынымен индукцияланған ЭҚК $\underline{E}_{aq}$ фаза бойынша МҚК $\underline{F}_{aq}$ дан 90° бұрышқа қалыс қалады, соған ұқсас ЭҚК $\underline{E}_0$ секілді фаза бойынша МҚК $\underline{F}_b$ ден де қалыс қалады).

Егер, магнитті тізбек қанығуға жақын болса, полюстің екпінді шетінің астындағы магнитті өрістің әлсіреуі жүгіртпе шетке қарағанда күштірек (1.6 бөлімсімен салыстыру керек). Ақырында, қорытқы магнитті ағын қоздыру орамасымен құрылған негізгі ағынмен салыстырғанда әлсіз болып табылады. *Магнитті жүйенің қанығуының* артуымен оның магнитті кедергісі артады және соның салдарынан қоздыру орамасымен индукцияланған ЭДС $\underline{E}_0$ бос жүріс кезінде ЭҚК-дан аз болып шығады. (11.8) теңдеуімен анықталатын қорытқы ЭҚК $\underline{E}$ келетін болсақ, магнитті тізбектің қанығу дәрежесіне байланысты бос жүріс кезінде қоздыру орамасымен индукцияланған ЭҚК көп болуы да, аз болуы да мүмкін.

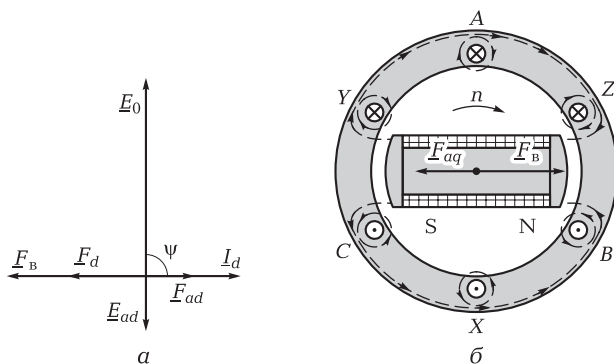
Зәкірдің көлденең ағынымен индукцияланған ЭҚК $\underline{E}_{aq}$ $\underline{I}_q$ көлденең тогының өсуімен артады. Осы шамалар арасындағы пропорционалдық коэффициенті кедергінің мөлшерлігі бар. Сонда ЭҚК мен ток арасындағы фазалар қозғалысын ескере отырып мынаны жазуға болады

$$\underline{E}_{aq} = -j \underline{L}_q x_{aq} \quad (11.9)$$

(мысалы (5.5) өрнегімен салыстыр).

x_{aq} шамасы зәкірдің көлденең ағынымен шартталған индуктивті кедергіні береді.

Индуктивті жүктеме кезіндегі зәкір реакциясы. Генератордың индуктивті жүктемесі кезінде фазалар қозғалысы қоздыру ағынымен индукцияланған $\underline{I}$ және ЭДС $\underline{E}_0$ зәкір токтарының арасындағы бұрыш 90° құрайды; зәкір ағыны және ток бойлық болып табылады: $\underline{I} = \underline{I}_d$ (11.9, *a* сурет). $\underline{F}_{ad}$ зәкірінің МҚК-ы фаза бойынша ЭДС $\underline{E}_0$ ден 90° бұрышқа қалыс қалады және $\underline{F}_b$ қоздыру орамасының МҚК фазасы бойынша қарама-қарсы. 11.9, *б* сурет векторлық диаграммаға сәйкес құрылған. 11.8, *б* суретімен сәйкестендіру оңай болу үшін $\underline{AX}$ статор шарғысындағы токтың лездік мәні максималды болған кезі бейнеленген, мұнымен қоса, $\underline{A}$ белсенді сымында ток *бізден* өтеді. Мұндай жағдайда, 11.9, *б* суретіндегі зәкірдің МҚК векторының кеңістіктік бағыты дәл 11.8, *б* суретіндегідей; алайда, индуктивті жүктеме жағдайында бұл вектор $\underline{E}_{aq}$ емес $\underline{F}_{ad}$ деп белгіленген (зәкір реакциясы бойлық, көлденең емес). Векторлық диаграммадағы секілді 11.9, *б* суретінде 11.9, *б* $\underline{F}_b$ қоздыру орамасының МҚК векторы $\underline{F}_{ad}$



11.9.-сурет. Индуктивті жүктеме кезіндегі синхронды генератордың МҚК векторлары:

a — векторлық диаграммада; b — кеңістікте

зәкірінің МҚК векторына қарама-қарсы орналасқан. Бұл қарастырылып отырған уақыт мезетіндегі кеңістіктегі ротордың орналасуын анықтайды. Осылай, индуктивті жүктеме кезінде A фазасындағы ток максималды мәнге AX шарғысындағы белсенді өткізгіштерге оның полюстері бағытталған кездегі күйге келгеннен кейін ротордың айналу кезеңі арқылы жетеді. AX шарғысында индукцияланған ЭҚК E_0 келетін болсақ, ол негізгі магнитті ағын болып саналады, онда оның лездік мәні полюстер осы шарғының өткізгіштеріне бағытталған кезде үлкен болады (ЭҚК E_0 МҚК F_{ad} дан 90° -қа озық болады).

Сонымен, индуктивті жүктемеде полюстердің магнитті осі зәкір орамасы өрісінің магнитті осімен 180° бұрышты құрайды (жалпы жағдайда 180 эл. град.). Бұл индуктивті жүктеме кезінде *зәкірдің бойлық магнитсіздену өрісі* қозады, ол кезде генератордың қорытқы ЭҚК-і қоздыру орамасының ЭҚК-нан аз болады.

Бойлық қорытқы МҚК F_d -ға арифметикалық тендеуге сай келеді

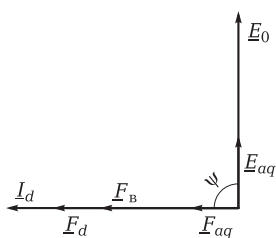
$$F_d = F_B - F_{ad}. \quad (11.10)$$

Зәкірдің бойлық ағынымен индукцияланған ЭҚК E_{ad} үшін мына өрнекті жазамыз (11.9):

$$E_{ad} = -jI_d x_{ad} \quad (11.11)$$

Мұнда, x_{ad} — зәкірдің бойлық ағынымен шартталынған индуктивті кедергі.

Сыйымдылықты жүктеме кезіндегі зәкірдің реакциясы. Генератордың сыйымдылықты жүктеме кезінде I және ЭДС E_0 зәкір тогының арасында ψ фазалардың қозғалысы 90° құрайды, бірақ ин-



11.10.-сурет. Сыйымдылықты жүктеме кезіндегі синхронды генератордың векторлық диаграммасы.

дуктивті жүктеме жағдайымен салыстырғанда ток озып кетеді (11.10 сурет). F_{ad} зәкірінің МҚК F_b қоздыру орамасының МҚК-мен фаза бойынша сәйкес келеді, сондықтан да зәкір реакциясы *бойлық магниттену* болып табылады. Бұл жағдайда қорытқы МҚК үшін мына теңдеуге тең болады:

$$F_d = F_b + F_{ad} \quad (11.12)$$

Бұл кезде қорытқы ЭҚК қоздыру орамасымен шартталған ЭҚК-дан асып кетеді. Генератормен қуат алатын тізбектің үлкен электрлік сыйымдылығында кернеудің ұлғаюы мүмкін.

Кеңістіктегі векторлар бейнесін осы бөлімде келтірілген талқылаулар негізінде алуға болады. Сыйымдылықты жүктеме жағдайында F_b қоздыру орамасының МҚК векторының сыйымдылықты жүктемесі жағдайында бағыты бойынша F_{ad} зәкірінің МҚК векторымен сәйкес келеді. Статордың белсенді өткізгіштеріндегі токтар бағыты дәл сол кезде 119, б суретіне сәйкес келеді, ротор көлденең күйге енеді, ал индуктивті жүктеме кезінде қарама-қарсы күйге келеді. АХ шарғысындағы ток максималды мәнге кезеңнің ширегінде жетеді, бұл кезде ротор полюстері осы шарғының белсенді өткізгіштеріне қаралады.

11.4. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫҢ ВЕКТОРЛЫҚ ДИАГРАММАЛАРЫ

Толық (негізгі) векторлық диаграмма. Синхронды генератордың векторлық диаграммасы бірқатар мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Көбіне, қажетті қоздыру тогын табуда I_b (немесе E_0 қоздыру орамасының сәйкес ЭҚК) берілген кернеуде U генераторы шығымында, φ бұрышымен анықталатын I жүктеме тогын табуда мәселе шешіледі. Кейде, берілген ЭҚК E_0 мәндерімен I тогы мен олардың арасындағы қозғалыс бұрышын ψ табу үшін U кернеуін табу талап етіледі. Векторлық диаграмма көмегімен генератор

сипаттамасын тұрғызуға (сипаттамалары туралы мағлұматтар одан әріде (11.5) бөлімсі) берілген), параллельді жұмысқа генераторларды қосу шарттарын анықтауға болады.

Айқын полюсті генератордың векторлық диаграммасын жасаған кезде көлденең және бойлық зәкір реакцияларын жеке-жеке қарастырады. Толық векторлық диаграмма (11.11, *a* сурет) Кирхгофтың екінші заңымен сәйкес жазылған кернеулер теңдеуін береді:

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_\sigma = \underline{U} + \underline{I}r.$$

Келтірілген теңдеуге кіретін алғашқы үш шаманың мағынасы 11.3 бөлімінде түсіндірілген; $\underline{E}_\sigma$ — Φ_σ зәкірінің сейілу ағынымен индукцияланған ЭҚК (сейілу ағыны мен ЭҚК сейілуы 5.1 бөлімінде қаралады); r — зәкір орамасының белсенді кедергісі.

Жазылған теңдеуден генератор шығымындағы кернеудің векторын бейнелейміз

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_\sigma - \underline{I}r.$$

(5.5) өрнегіне ұқсас ЭҚК сейілуін жазамыз:

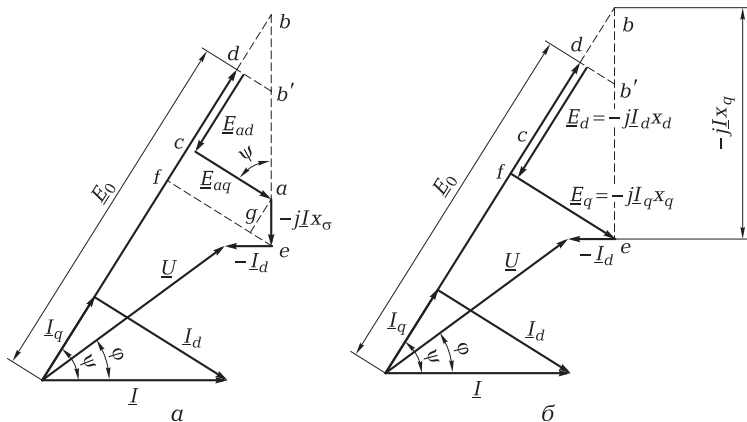
$$\underline{E}_\sigma = -jI x_\sigma,$$

мұнда x_σ — сейілудің индуктивті кедергісі.

Бұл өрнек фаза бойынша ЭҚК сейілуінің статор тогынан 90° -қа салыстырмалы қалуын көрсетеді (жүктеме тогы).

(11.9) және (11.11) өрнектерімен сәйкес ұқсастықта $\underline{E}_{aq}$ және $\underline{E}_{ad}$ шамаларын жазуға болады)

Кернеу векторы үшін соңында мынаны аламыз



11.11.-сурет. Айқын полюсті генератордың векторлық диаграммасы: *a* — толық (негізгі); *б* — қысқартылған (түрлендіруші).

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} - jI x_\sigma - I r. \quad (11.13)$$

Бұл теңдеу қайталама трансформатор орамасының кернеуіне арналып жазылған (5.14) теңдеуіне сәйкес (генераторды екіншілік трансформатор орамасымен салыстырған дұрыс, себебі онда индукцияланған ЭҚК берілген көздің ЭҚК рөлін атқарады, ал желідегі кернеуге қатысты E_1 ЭҚК индукциясының алғашқы трансформатор тізбегі ЭҚК қарсы келеді). Сонымен қатар, (11.13) және (5.14) теңдеулері электр энергиясының кез келген көзіне жалпы мағына береді: көздің шығысындағы кернеу өздігінен ішкі көз кедергісінен кернеудің құлау шамасының ЭҚК-нан ерекшеленеді.

Векторлық диаграмма (11.11, *a* суретін қараңыз) белсенді-индуктивті жүктеме жағдайында бейнеленген (11.7 суреті дәл сол диаграмманы қысқартылған түрде береді). I тогының векторы тіреуіш векторы ретінде таңдалынған (ол арқылы барлық бұрыштар өлшенеді), және 11.7 суретімен салыстырғанда қарастырылып отырған диаграммада бұл вектор көлденең берілген.

Жүктемеде индуктивті кедергінің болуына байланысты зәкірдің бойлық реакциясы магнитсіздендіруші болып саналады (11.3 бөлімін қараңыз), зәкірдің бойлық реакция ағынымен индукцияланған ЭҚК $\underline{E}_{ad}$ векторы коздыру орамасымен индукциялайтын ЭҚК $\underline{E}_0$ векторына қарсы бағытталған (11.9, *a* суретіндегідей). Зәкірдің көлденең реакция ағынымен индукцияланған ЭҚК $\underline{E}_{aq}$ векторы 11.8, *a* суретіндегідей $\underline{E}_0$ векторына салыстырмалы түрде 90° бұрышқа қалу жағына қарай беттелген. $(-j)$ қосылатыны келесі (11.13) теңдеу компоненті алдында I векторына салыстырмалы түрде 90° бұрышқа айналып қалғанын көрсетеді. Соңында, $I r$ туындысы алдындағы минус белгісі I векторына қарсы бағытталған векторлық диаграмма.

Айқын емес полюсті генератор жағдайында 11.1, *a* суретіндегі d , b және b' нүктелеріне acd тікбұрышты үшбұрышы сәйкес келеді, оның катеттерінің E_{aq} және E_{ad} ұзындықтары (ЭҚК үшін таңдалынған ауқымда), I гипотенузасының I_q және I_d катеттерінің үшбұрышына ұқсас (токтар үшін таңдалынған ауқымда). Бұл тұжырым x_{aq} және x_{ad} кедергілерінің теңдігі жағдайында (11.9) және (11.11) өрнектерінен шығады.

Синхронды индуктивті кедергілер. Айқын полюсті генератордың векторлық диаграммасын қарастыруды жалғастыра отырып (11.11, *a* суретін қараңыз), I ток векторы мен ЭҚК $\underline{E}_0$ арасындағы ψ бұрыш *bac* және *aeg* бұрыштарына тең екенін байқауға болады (бұл I векторының *ba* және *ae* кесінділеріне перпендикулярлығынан және

$\underline{E}_0$ векторының ac және eg кесінділеріне перпендикулярлығынан шығады).

$ef = eg + gf$ кесінділерін қарастырамыз. Жақтары ЭҚК ауқымында және кернеудің өлшенетін age тікбұрышты үшбұрышынан мынаны аламыз: $eg = I_x \cos \psi$. ac кесіндісіне тең gf кесіндісі $\underline{E}_{aq}$ векторының модулін береді. Бұл жағдайда

$$ef = I_x \cos \psi + \underline{E}_{aq} = I_q x_\sigma + I_q x_{aq} = I_q x_q = E_q. \quad (11.14)$$

бұл жерде (11.5) және (11.9) теңдеулері ескеріліп, мына белгілер енгізілген

$$x_q = x_{aq} + x_\sigma \quad (11.15)$$

және $E_q = I_q x_q$. Құрамына көлденең осі бойынша зәкір реакциясының индуктивті кедергісі мен сейілдудің индуктивті кедергісін кіретін x_q шамасы *көлденең осі бойынша синхронды индуктивті кедергі* деп аталады.

Осыған ұқсас $fd = fc + cd$ кесінділерін қарастырайық. fc кесіндісі ga кесіндісіне тең. age үшбұрышынан біз мынаны аламыз: $ga = I_x \sin \psi$. cd кесіндісі $\underline{E}_{ad}$ векторының модулін береді. Сонымен,

$$fd = I_x \sin \psi + E_{ad} = I_d x_\sigma + I_d x_{ad} = I_d x_d = E_d. \quad (11.16)$$

Бұл жерде (11.3) және (11.11) теңдеулері ескеріліп, мына белгілер енгізілген

$$x_d = x_{ad} + x_\sigma \quad (11.17)$$

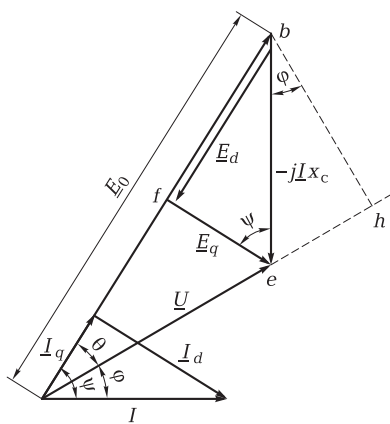
және $E_d = I_d x_d$. Құрамына бойлық осі бойынша зәкір реакциясының индуктивті кедергісі мен сейілдудің индуктивті кедергісін кіретін x_d шамасы *бойлық осі бойынша синхронды индуктивті кедергі* деп аталады.

Қысқартылған (түрленген) векторлық диаграмма. Түрленген векторлық диаграмманы тұрғызу үшін тәжірибелік жолмен оңай анықталатын r , x_q , x_d шамасының мәндерін білу керек (одан әрі 11.6 бөлімінен қараңыз). 11.11, б суретінде көрсетілген түрленген диаграмма сәйкес векторлардың бағыттарын және (11.14) және (11.16) теңдеулерін ескере отырып, негізгі диаграммадан алынады. Оның ішінде, диаграммада ЭҚК фазасы бойынша E_d тогының I_d тогынан 90° -қа қалуы бейнеленеді, оған векторлық (кешенді) теңдеуі сәйкес келеді $\underline{E}_d = -jI_d x_d$.

(11.13) теңдеуінің орнына түрленген диаграмма үшін мына теңдеуді аламыз

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_d + \underline{E}_q - Ir, \text{ немесе } \underline{U} = \underline{E}_0 - jI_d x_d - jI_q x_q - Ir. \quad (11.18)$$

bfe тікбұрышты үшбұрышы I_d және I_q катеттері бар үшбұрышқа және I гипотенузасына ұқсас және be үшбұрышының bfe гипоте-



11.12.-сурет. Айқын емес полюсті генератордың векторлық диаграммасы.

нузасы $I x_q$ -ға тең. Қарастырылып отырыған үшбұрыштың b шыңы айқын полюсті генератордың векторлық диаграммасына жатпайды, алайда жасалған ескерту одан әрі қолданылатын болады.

Айқын емес полюсті генератордың векторлық диаграммасы.

Айқын емес полюсті машинадағы зәкірдің көлденең және бойлық реакция ағындарымен жүретін индуктивті кедергілер бір-біріне тең: $x_{aq} = x_{ad}$. Сондықтан да, синхрондық индуктивті кедергілер де осьтер бойынша тең болады ((11.15) және (11.17) өрнектерін қараңыз): $x_q = x_d$. Мұндай жағдайда

$$\frac{E_q}{E_d} = \frac{I_q x_q}{I_d x_d} = \frac{I_q}{I_d}$$

және, бұрын айтылғандай 11.11 суретіндегі d , b және b' нүктелері сәйкес. Бұл 11.12 суретінде көрсетілген айқын емес полюсті генератордың векторлық диаграммасында кесінделеді. Диаграмма $-I r$ векторын есептемегенде қысқартылған: қуатты генератордың белсенді кедергісіндегі кернеудің төмендеуі аз (штрихты сызықпен орындалған қосымша тұрғызылым 12.3 бөлімінде қолданылады).

Осьтер бойынша синхронды индуктивті генераторлардың кедергілері ($x_c = x_q = x_d$) айқын емес полюсті генератордың синхронды индуктивті кедергісі үшін бірдей x_c белгіні қолдануға мүмкіндік береді, сонымен қатар, ($x_a = x_{aq} = x_{ad}$) зәкірдің реакция ағынымен жүретін индуктивті кедергі үшін бірдей белгі x_a . x_c және x_a шамалары бір-бірімен (11.15) және (11.17) теңдеуіне ұқсас өрнектермен байланысты:

$$x_c = x_a + x_a. \quad (11.19)$$

Айқын емес полюсті генератордың векторлық диаграммасы

(11.12 суретін қараңыз) мына теңдеуге жауап береді

$$\underline{U} = E_0 - jI x_c, \quad (11.20)$$

мұнда $I x_c$ — синхронды индуктивті кедергідегі кернеудің төмендеуі бге тік бұрышты үшбұрышының катеттері $E_d = I x_c \sin \psi$ және $E_q = I x_c \cos \psi$ шамаларға сәйкес келеді.

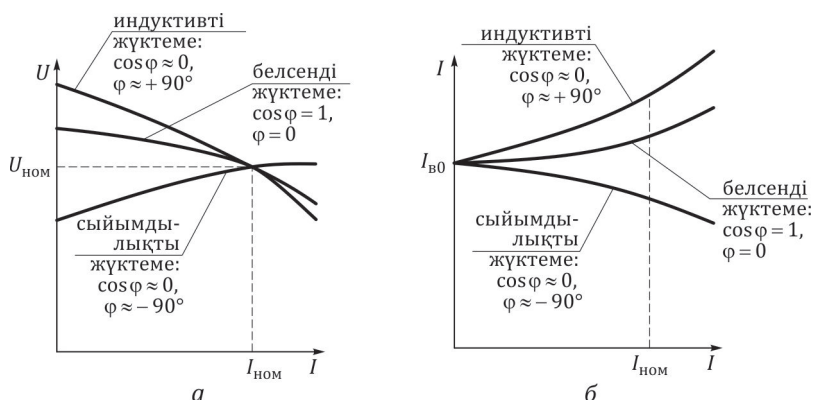
11.5.

СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ СИПАТТАМАСЫ

Өзінің қолданыстағы қасиеттерін жан-жақты сипаттайтын машиналар сипаттамаларын машиналарды сынау кезінде алынады. Үш фазалы генератордың сипаттамасын алу үшін оның шығындарымен әр түрлі сипаттағы (белсенді, индуктивті, сыйымдылықты) реттелетін жүктемені біріктіреді, ал қоздыру орамасын тұрақты кернеу көзіне қосады және қоздыру тогының реттелу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Генератор тірегін қандай да бір бастапқы қозғалтқыш арқылы номиналды жиілікпен $n_{\text{ном}}$ айналымға енгізеді және айналым жиілігін өзгеріссіз ұстап тұрады. Сызықтық кернеуді генератор шығымдарында, жүктеме тогында (сызықтық ток), сонымен қатар, қоздыру тогын өлшейді.

Сыртқы сипаттамалары. Бұл кернеу тәуелділіктері U айналым жиілігінің және қоздыру тогының тұрақты мәндерінде I жүктеме тогы арқылы генератор қысымында жүреді. Сыртқы сипаттамаларын белсенді жүктеме кезінде алады, яғни бірге тең болатын жүктеменің қуатты коэффициентінде ($\cos \varphi = 1$), индуктивті және сыйымдылықты жүктемелерде алынады (шекті жағдайларда $\cos \varphi = 0$).

Сыртқы сипаттамаларды алу кезінде бастапқы болып номиналды режим немесе бос жүріс режимі саналады. 11.13, а суретінде сыртқы сипаттамалар келтірілген, олардың алынуы кезінде алдымен генератордың номиналды жұмыс режимі орнатылды: қоздырудың номиналды тогы кезінде $I_{\text{в.ном}}$ генератор шығысында номиналды кернеу $U_{\text{ном}}$, ал сызықтық желілер бойынша номиналды ток $I_{\text{ном}}$ өтетіндей етіліп жүктеме кедергісі таңдалынды. Генераторды босату кезінде (жүктеме кедергісінің артуы кезінде) сыртқы шығымында кернеу өзгермейді. Кернеудің өзгеру себептері (11.13) теңдеуімен сипатталады. Басты себебі болып зәкір реакциясының әсерімен машинаның қорытқы ағынының өзгеруі жатады. Басқа себептер: индуктивті сәйліс кедергісінде кернеудің азаюы және зәкір орамасының белсенді



11.13.-сурет. Синхронды генератор сипаттамалары:

а — жүктемені төмендету тәсілімен алынған сыртқы; *б* — реттеуші

кедергісінде кернеудің азаюы (қорытқы магнит ағынының өзгеруі және белсенді кедергідегі кернеудің азаюы жүктемені және тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторының сыртқы сипаттамаларын талқылауда қарастырылды (2.3 бөлімін қараңыз)).

Жүктеме тоғы аз болған сайын, соғұрлым зәкірдің белсенді кедергісіндегі кернеудің азаюы аз болады. Зәкірдің белсенді кедергісінің болуы генератор жүктемесінің босауына байланысты тұрақты ток генераторында да кернеудің артуына алып келеді.

Зәкір реакциясына келетін болсақ, оның әрекеті жүктеме сипатына тәуелді. *Индуктивті жүктеме* кезінде зәкір реакциясы бойлық магнитсізденуші болып табылады (11.3 бөлімін қараңыз). Босау кезінде зәкір реакциясы азайып, генератор шығысындағы кернеу артады. Осылай, индуктивті жүктеме кезінде зәкір реакциясы мен зәкірдің белсенді кедергісі бір бағытта кернеудің өзгеруіне қарай әрекет етеді. *Белсенді жүктеме* кезінде ток көбіне кернеудің артуымен бірге жүреді, себебі бұл кезде көлденең осі бойынша зәкір реакциясы әлсірейді (белсенді жүктеме кезіндегі қорытқы ЭҚК өзгерісінің мүмкін болатын өзгерістері 11.3 бөлімінде қаралған).

Сейілу ағынының индуктивті кедергісінде кернеудің азаюының әсері ресми түрде зәкір реакциясының әсерімен қатар жүреді, бұл жерде x_q және x_d синхронды индуктивті кедергілердің енгізілген шамаларын басшылыққа алады ((11.15) және (11.17) өрнектерін қараңыз). Бұған қоса, зәкір реакциясының сәйкес бойлық және көлде-

нең ағындарымен индукцияланған ЭҚК E_{aq} және E_{ad} орнына (11.14) және (11.16) өрнектерімен анықталатын ЭҚК E_q және E_d қарастырылады, және (11.13) кернеу теңдеулерінің орнына (11.18) қарастырылады.

Сыртқы сипаттамалары бойынша кернеудің пайыздық өзгерісі анықталады:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (11.21)$$

Мұндағы E_0 — осы режимде кернеуге тең болатын бос жүріс режиміндегі генератор ЭҚК.

Сыртқы сипаттамалар генератордың негізгі пайдаланушылық сипаттамалары болып табылады.

Реттеуші сипаттамалар. Генератор шығымдары мен айналым жиілігіндегі кернеудің тұрақты мәндері кезіндегі I_b генераторы қоздыру тогының I жүктеме тогына тәуелділігі ұсынылады. Сыртқы, реттеуші сипаттамалар секілді әр түрлі жүктеме түрлері үшін алады (жүктеме қуатының әр түрлі коэффициенттері үшін). Бұл сипаттамалар U кернеуінің генератор шығымында өзгеріссіз қалуы үшін қоздыру тогын қаншалықты өзгертуге болатынын көрсетеді (оның шініде, $U_{\text{ном}}$ номиналды теңдеуіне тең болады). Оларды реттеуші құрылғыны таңдау мен жобалау үшін қолданады.

Әр түрлі жүктеме түрлеріне арналған реттеуші сипаттамалар 11.13, б суретінде келтірілген. Индуктивті жүктеме кезінде жүктеме тогы артқан кезде болатын реттелмейтін генератор шығымдарындағы кернеудің азаюы аса маңызды. Сондықтан да, кернеуді өзгеріссіз ұстап тұру үшін қоздыру тогының көп өзгерісі керек болады, себебі қоздыру тогын негізгі магнитті ағын анықтайды, яғни индукциялайтын ЭҚК анықтайды. ((9.13) өрнегін қараңыз). Индуктивті және белсенді жүктемелерде жүктеме тогының өсуімен қоздыру тогын да арттыру керек, ал сыйымдылықты жүктемеде — зәкірдің магниттеуші әсерін өтеу үшін азайту керек.

11.13, б суретіндегі I_{b0} символы ретінде қоздыру тогы белгіленген, онда *бос жүріс режиміндегі* кернеу номиналдыға тең болады ($E_0 = U_{\text{ном}}$).

Реттеуші сипаттамалары бойынша жүктеме тогы нөлден номиналды мәнге дейін өзгергендегі кернеудің өзгеріссіз мәніне сәйкес келетін қоздыру тогының пайыздық өзгерісі анықталады:

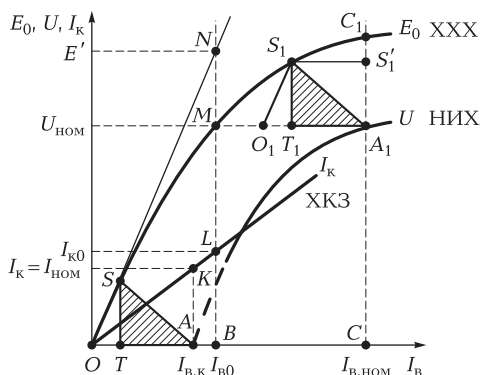
$$\Delta I_B = \frac{I_{B, \text{НОМ}} - I_{B0}}{I_{B0}} 100. \quad (11.22)$$

Бос жүріс режимінің сипаттамасы (БЖС). Генератордың тұйықталған сыртқы тізбегінде ($I = 0$) және ротордың тұрақты айналым жиілігінде орамадағы индукцияланған ЭҚК E_0 статорының I_B қоздыру тогына тәуелділігін көрсетеді. Бұл сипаттама машинаның магнитті тізбегінің қанығуын бағалауға мүмкіндік береді; оның көмегімен векторлық диаграммалар және басқа да машина сипаттамалары тұрғызылуы мүмкін. Бос жүрістің сипаттамалық түрі 11.14 суретте екі басқа да сипаттамалармен бірге көрсетілген, олар алда қарастырылатын болады.

ХХХ осьтері бойынша, E_0 және I_B шамаларының орнына көбінесе $E_0^* = E_0 / U_{\text{НОМ}}$ и $I_0^* = I_B / I_{B, \text{НОМ}}$ салыстырмалы шамаларда құрылған әр түрлі генераторлардың бос жүріс сипаттамасы бір-бірінен болар болмас ерекшеленеді. Орташа және үлкен қуатты генераторлар бойынша тәжірибелік мәліметтерді жалпылау негізінде алынған орташа ХХХ қалыпты ХХХ деп аталады. Қайта құрылған генератордың сипаттамасы номиналдыға жақын болуы керек. Тәжірибе жүзінде алынған және номиналды сипаттамалардың айырмашылығы генератордың дұрыс емес есептелгенін меңзейді. Оның ішінде, экспериментті және номиналды сипаттамалардың түзу сызықты бөліктерінің сәйкес келмеуі әуе саңылауының дұрыс емес таңдалғаны туралы айтады.

Синхронды генератор мен тұрақты ток генераторының бос жүрісінің сипаттамалары ұқсас.

Синхронды генератордың номиналды сипаттамасы 2.3 суретін-



11.14.-сурет. Синхронды генератордың (бос жүрісті, жүктемелі және үшфазалы қысқа тұйықталу) және реактивті үшбұрыштың (сипаттамалық) сипаттамасы.

де 3 есептемелік сипаттамасына ұқсас координаталар басы арқылы өтеді.

Қоздыру тогын азайту кезінде тәжірибелік жолмен алынған сипаттама 2.3 суретіндегі 2 сипаттамасына ұқсас. Ол қалдық ЭҚК-ға сәйкес келетін $E_{\text{ост}}$ нүктесіндегі E_0 осін қиып өтеді, ол шамамен номиналды кернеуден $U_{\text{ном}}$ 2...3 % тең. ЭҚК $E_{\text{ост}}$ машинаның магнитті өрісінің қалдығымен құрылады.

Жүктемелі сипаттамалар. Тұрақты жүктеме тогы (оның ішінде, номиналды ток) және тұрақты айналым жиілігі кезіндегі генератор қысқышындағы кернеудің U қоздыру тогына $I_{\text{в}}$ тәуелділігін көрсетеді. Әр түрлі жүктемелер бойынша құрылған жүктемелік сипаттамалар үлкен не аз дәрежеде бос жүріс сипаттамасымен сәйкес келмейді, себебі бұл қоздыру тогы кезіндегі ЭҚК генератор мәні оның шығымында кернеу мәндерімен сәйкес келмейді. Генератор қасиеттерінің талдауы үшін индуктивті жүктеме ($\cos\varphi = 0$, $\varphi = +90^\circ$). кезінде құрылған жүктемелі индуктивті сипаттаманың маңызы зор (НИХ, 11.14 суретін қараңыз). A_1 нүктесінің сипаттамасы генератор шығымындағы жүктеменің номиналды тогына $I_{\text{ном}}$ және номиналды кернеуіне $U_{\text{ном}}$ сәйкес келеді. Осы параметрлер орындалатын қоздыру тогы қоздырудың номиналды тогы $I_{\text{в.ном}}$ болып табылады. A_1 сол жақ нүктесінде орналасқан әр нүктені екі түрмен алады:

1) Қоздыру тогын төмендетеді; осы кезде ЭҚК генераторы мен жүктеме тогы азаяды;

2) Жүктеме кедергісі қоздыру тогының жаңа мәнінде жүктеме тогы бастапқы мәнге $I_{\text{ном}}$ ие болатындай етіп азайтады.

Сонымен, алдыңғыдан сол жақта орналасқан жүктеме сипаттамаларының әр нүктесін жүктеменің азғантай кедергісі кезінде алады.

Тәжірибелік жолмен алынатын НИХ бөлігі 11.14 суретте тұтас сызықпен көрсетілген.

Координатты жазықтықтағы көлденең осінде орналасқан А сипаттамалық шеткі нүктесі генератор шығымындағы кернеудің нөлдік мәніне және жүктеме кедергісінің нөлдік мәніне сәйкес келеді, яғни қысқа тұйықталу режиміне. Осылай, $I_{\text{в.к}}$ тогы — бұл қоздыру тогы, онда генератордың қысқа тұйықталу тогы номиналды токқа $I_{\text{ном}}$ тең болады. Көлденең осі бар жүктеме сипаттамасының А қиылысу нүктесін қысқа тұйықталу сипаттамасынан табады.

Номиналды жүктеме тогы үшін құрылған жүктеме сипаттамалары басқа жүктеме сипаттамаларында дәл солай А нүктесі арқылы

өтеді. Негізінде, қысқа тұйықталу режимі белсенді, индуктивті және сыйымдылықты барлық жүктеме кедергілерінің нөлге теңдігін көрсетеді.

Басқа жүктеме сипаттамасының нүктелері *белсенді жүктеме* кезінде НИХ-қа қарағанда жоғары орналасады, себебі зәкірдің көлденең әсері бойлық магнитсіздендірушіге қарағанда аз дәрежеде машинаны магнитсіздендіреді (11.3 суретін қараңыз). Сыйымдылықты жүктеме кезіндегі жүктеме сипаттамасы одан да жоғары өтеді, оған қоса, қоздыру тогының кейбір мәнінде ол бос жүрістің сипаттамасымен қиылысады, және одан әрі жоғарыда орналасады, бұл генератор шығымында кернеудің ЭҚК-дан жоғары болатын зәкірдің бойлық магнитсіздендіру реакциясымен түсіндіріледі.

Үш фазалы қысқа тұйықталу сипаттамасы (ҚТС, 11.14 суреті). Бұл генератордың зәкір тогының C1, C2, C3 зәкір орамасының қысқа тұйықталған шығымындағы және өзгеріссіз айналым жиілігіндегі қоздыру тогына тәуелділігін көрсетеді. Мұнда зәкір тогы қысқа тұйықталу тогы болып табылады I_k .

Зәкір орамасының белсенді кедергісі индуктивтімен салыстырғанда аз болуы есебінен қысқа тұйықталу тогы ЭҚК-дан 90° қалыс қалады және зәкірдің бойлық магнитсіздендіру реакциясын құрады. Зәкірдің үлкен магнитсіздендіру реакциясы салдарынан машинаның магнитті тізбегі *қанықпаған* болып табылады және ҚТС *түзу сызықты* көрсетеді. Бұрын айтылғандай, $I_{в.к}$ белгісі ретінде қоздыру тогы белгіленген. Онда қысқа тұйықталу тогы I_k номиналды токқа тең $I_{ном}$.

Үшфазалыға қоса, екі фазалы және бір фазалы қысқа тұйықталуды ажыратады. Екі фазалы тұйықталу кезінде генератордың екі шығымы (C1 және C2, C2 және C3 немесе C3 және C1) бір-бірімен электр арқылы қосылған. Бір фазалы қысқа тұйықталуда статор орамасының бір фазасы тұйықталған болады. Сол зәкірдің бір қоздыру тогында үшфазалы ТС кезінде зәкір тогы аз болады, ал бір фазалыда – көп болады. Бұл зәкірдің магнитсіздендіруші әсері *тура реттілік* токтарымен құрылады, ал үшфазалы ТС кезінде зәкір орамасында тек осы токтар өтеді. Бір фазалы ТС режимінде *кері реттілік* тогы үлкен мәнге ие, ал зәкірдің магнитсіздендіру әсері аз болып қалады (токтардың симметриялы емес үшфазалы жүйесінің ыдырауы – тура ток, кері және нөлдік реттілік – теориялық электротехникада зерттеледі).

Мұнда E_{ad} ЭҚК орнына оның өрнегі зәкірдің бойлық реакциясымен сипатталатын ток пен индуктивті кедергі арқылы жазылған.

(11.23) теңдеуіне (11.15, *a* суретін қараңыз) векторлық диаграммасы жауап береді, онда $\underline{E}_d = -jI_{\kappa} x_d$ векторы көрсетілген, мұнда x_d — бойлық осі бойынша синхронды индуктивті кедергі берілген ((11.17) өрнегін қараңыз).

Генератордың қысқа тұйықталуы кезінде оның шығымындағы кернеу нөлге тең, ал ток іс жүзінде таза индуктивті болып саналады. Сол үшін (11.23) теңдеуін қолдана отырып ЭҚК теңдеуін жазамыз:

$$\underline{E}_0 - jI_{\kappa} x_{ad} - jI_{\kappa} x_d = \underline{E}_0 - jI_{\kappa} x_d = 0. \quad (11.24)$$

Қысқа тұйықталу кезіндегі векторлық диаграмма 11.15, *б* суретінде көрсетілген.

Бойлық осі бойынша синхронды индуктивті кедергінің қанықпаған мәнінің анықтамасы. $\underline{E}_0 - jI_{\kappa} x_d = 0$ (11.24) теңдеуінен генератордың қысқа тұйықталуы кезінде векторлар модульдерінің теңдігін байқауға болады: $E_0 = I_{\kappa} x_d$ (11.15, *б* теңдеуін қараңыз). Синхронды индуктивті кедергінің мәні тұрақты болып саналмайды x_d ; ол генератордың магнитті тізбегінің қанығу дәрежесіне байланысты. Қысқа тұйықталу режимінде магнитті тізбек қанықпаған; бұл жағдайда *бойлық осі бойынша синхронды индуктивті кедергінің $x_d^{\text{ин}}$ қанықпаған мәні туралы айтылады.* Осылай,

$$x_d^{\text{ин}} = \frac{E_0}{I_{\kappa}}, \quad (11.25)$$

мұнда E_0 — XXX бастапқы түзу сызықты аймағына сәйкес келетін $I_{\text{в}}$ аз қоздыру тогы кезінде қоздыру орамасының ағынымен индукцияланған генератор ЭҚК-і (бұл сипаттама аймағы машинаның қанықпаған магнитті тізбегіне сәйкес келеді).

Іс жүзінде $x_d^{\text{ин}}$ анықтау үшін $I_{\text{в}}$ аз мәнін қолданады, ал мысалы, $I_{\text{в0}}$ қоздыру тогының мәні, онда кернеу *бос жүріс режимінде* номиналдыққа тең ($E_0 = U_{\text{ном}}$). Алайда, мұнда (11.25) формуласы алымында $E_0 = U_{\text{ном}}$ мәнін емес, E' мәнін қою керек, ол ордината секілді екі түзудің қиылысу нүстесімен анықталады: бастапқы XXX аймағының жалғасы болып табылатын түзу *ON* және көлденең ось нүктесінен $I_{\text{в0}}$ абсциссасымен шығатын тік *BN* (11.14 суретін қараңыз). $I_{\text{в0}}$ қоздыру тогына сәйкес келетін үшфазалы қысқа тұйықталу тогы $I_{\text{к0}}$ деп белгіленеді және *BL* кесіндісімен анықталады. Шаманың әр қайсысы — қоздыру тогы ЭҚК және қысқа тұйықталу тогы — *өзінің жеке ауқымында* сипаттамалары бойынша анықталады.

Сонымен, синхронды индуктивті кедергінің қанықпаған мәні тү-

зетілген XXX және HKZ арқылы анықталады:

$$x_d^{\text{нн}} = \frac{E'}{I_{\text{к0}}} = \frac{BN}{BL}. \quad (11.26)$$

Бойлық осі бойынша синхронды индуктивті кедергінің қаныққан мәнінің анықтамасы. Қоздыру тогы артқан кезде генератордың магнитті тізбегінің қанықтығы артады, ал синхронды индуктивті кедергінің мәні x_d кемиді. Индуктивті жүктеме кезінде (11.23) теңдеуіне сәйкес $U = E_0 - jI x_d$, себебі $x_d = x_{ad} + x_\sigma$ болады. Осы теңдеуге кіретін барлық векторлар бір түзудің бойында жатқандықтан (11.15, *a* суретін қараңыз), мынадай арифметикалық теңдікті аламыз $U = E_0 - I x_d$, ол жерден аламыз

$$x_d = \frac{E_0 - U}{I}. \quad (11.27)$$

Машинаның магнитті жүйесінің қанығуын ескере отырып табылған x_d мәні синхронды индуктивті кедергінің *қаныққан мәні* деп аталады.

Индуктивті жүктеме кезінде генератор кернеуі номиналды $U_{\text{ном}}$ ға тең болатын $I_{\text{в.ном}}$ қоздыру тогы үшін синхронды индуктивті кедергінің қаныққан мәні мынаған тең

$$x_d = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{A_1 C_1}{I_{\text{ном}}}, \quad (11.28)$$

мұнда $A_1 C_1$ — ЭҚК ауқымында және кернеуінде өлшенетін XXX және НИХ арасындағы ұзындық (11.14 суретін қараңыз); $I_{\text{ном}}$ — жүктеме сипаттамасы алынған статордың номиналды тогы.

Қысқа тұйықталудың арақатынасын анықтау. Қысқа тұйықталу арақатынасы (ҚТА) — генератордың бірқатар қасиеттерін талқылауға мүмкіндік беретін есептеу шамасы, мысалы, желімен бірге оның жұмысының тұрақтылығы туралы. ҚТА анықтамасы бойынша келесідей өрнектеледі:

$$\text{ҚТА} = \frac{I_{\text{к0}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (11.29)$$

мұнда $I_{\text{к0}}$ — $I_{\text{в0}}$ қоздыру тогы кезіндегі үшфазалы қысқа тұйықталу тогы (бұрын айтылғандай, $I_{\text{в0}}$ — қоздыру тогы, мұнда кернеу бос жүріс кезінде номиналдыға тең болады: $E_0 = U_{\text{ном}}$).

Қысқа тұйықталу сипаттамасы түзу сызықты беретіндіктен (тура пропорционалдық графигі), ҚТА қоздыру тогының сәйкес мәндерінің арақатынасы ретінде есептелінуі мүмкін, себебі мұндай тікбұрышты үшбұрыштардың сәйкес катеттері *OBL* және *OAK* пропорционал болады (11.14 суретін қараңыз):

$$QTA = \frac{I_{B0}}{I_{BK}} = \frac{OB}{OA}, \quad (11.30)$$

Бұл жерде $I_{BK} — I_K$ қысқа тұйықталу тогы $I_{НОМ}$ номиналды токқа тең қоздыру тогы болады.

ҚТА аз синхронды машиналар жүктеменің тербелісі кезінде кернеудің үлкен өзгерісімен сипатталады және параллельді жұмыс кезінде тұрақтылығы аз болады.

Синхронды айқын емес полюсті машиналардың ҚТА-сы (мысалы, турбогенераторлар) 0,5...0,7 құрайды (яғни, оларда $I_{K0} I_{НОМ}$ қарағанда аз болады және сәйкесінше $I_{B0} I_{BK}$ қарағанда аз болады). Қуатты синхронды айқын емес полюсті машиналардың ҚТА-сы әдетте ОКЗ 1,0.1,4 аралығында болады. Орташа және аз қуатты айқын емес машиналардың бұл параметріндегі мәні 2,0 және одан жоғарыны құрайды.

Индуктивті сөйілу кедергісін анықтау. Индуктивті кедергі x_σ келесідей орындалады:

- НИХ-ғы номиналды кернеуге сәйкес келетін A_1 нүктесінен сол жақта (11.14 суретін қараңыз), сәйкес ауқымдағы $I_{B,K}$ қоздыру тогына тең болатын $A_1 O_1$ кесіндісін артқа қалдырады: $A_1 O_1 = I_{BK} = AO$;
- O_1 нүктесі арқылы S_1 нүктесінде XXX-пен қиылысқанға дейін бастапқы түзу сызықты XXX аймағына параллель болатын түзуді жүргізеді;
- S_1 нүктесінен $S_1 T_1$ перпендикуляр болатын $A_1 O_1$ түзуін жүргізеді. $S_1 T_1$ перпендикуляр ұзындығы (кернеу ауқымында) индуктивті сөйілу кедергісінде кернеудің азаюын келесідей көрсетуге болады: $S_1 T_1 = I_{НОМ} x_\sigma$.

$$x_\sigma = \frac{S_1 T_1}{I_{НОМ}}. \quad (11.31)$$

Сонда, x_σ мәнін анықтау кезінде орындалатын құрылымдардың түрі келесі бөлімде түсіндіріледі.

Сипаттамалық үшбұрыш. x_σ мәнін анықтау кезінде құрылған $S_1 T_1 A_1$ үшбұрышы синхронды генератордың *сипаттамалық үшбұрышы* деп аталады (11.14 суретінде ол штрихталған). Бұл үшбұрыштың $T_1 A_1$ катеті зәкір тогымен құрылған МҚК-не пропорционал болады, яғни, зәкір реакциясын сипаттайды: егер зәкір реакциясы болмаса, онда қысқыштарда $U_{НОМ}$ кернеу генераторын алу үшін қоздыру тогын алу керек болады $I_{B,НОМ} = OC$ орнына $I'_{B,НОМ} = OC - T_1 A_1 I_{B,НОМ} = OC$ (тұрақты ток генераторының сипаттама-

лық үшбұрыш арақатынасында 2.3 бөліміндегі келтірілген талқылауларды қараңыз). Зәкір реакциясы зәкірдің бойлық реакция ағынымен анықталатын x_{ad} индуктивті кедергісінде кернеудің азаюын анықтайтын $C_1' S_1'$ тік кесіндісімен беріледі: $I_{ном} x_{ad} = C_1 A_1 - S_1' A_1 = C_1 S_1'$ (тағы векторлық диаграммадағы сәйкес кесінділерді қараңыз, 11.15, а суреті).

Бұрын айтылғандай, сейілу ағынының әсері сипаттамалық үшбұрыштың $S_1 T_1$ катетімен анықталады. Көлденеңді осьте осы фактор МҚК-не пропорционал сейілу ағынымен байланысты $O_1 T_1$ кесіндісімен ескеріледі.

Жүктеме сипаттамасы зәкірдің айнымалы тогы кезінде алынған, одан мынадай тұжырым жасауға болады, әр түрлі НИХ нүктелері үшін құрылған сипаттамалық үшбұрыштар біріне бірі тең. Бұл осы қоздыру тогы үшін құрылған сипаттамалық үшбұрышты оның S_1 шыңы бос жүрістің сипаттамасы бойынша сырғанайтындай етіліп өзіне параллель болатындай етіп орналастыру керек, ал A_1 шыңы жүктемелі индуктивті сипаттаманы бейнелейді (осы тәсілмен құрылған НИХ алынғаннан біршама эксперименталды түрде өзгеше болады). STA сипаттамалық үшбұрышы, оның көлденең катеті I_b осінде жатыр, оның бос жүрісінде түзу сызықты сипаттамалық аймағында S шыңы бар.

Бұрын айтылғанды қорытындылаймыз. Қоздырудың әр түрлі нүктелерінде сипаттамалық үшбұрыш XXX және НИХ координатты жазықтығында әр түрлі күйлерге енеді. Оған қоса, сейілу ағынының әсерін анықтайтын OT және ST кесінділерінің ұзындықтары өзгеріссіз қалады. Өзгеріссіз болып зәкір реакциясын сипаттайтын (зәкірдің МҚК-не пропорционал) TA кесіндісінің ұзындығы да жатады. Алайда, қоздыру тогын арттыру кезіндегі магнитті қанығудың артуымен байланысты сипаттамалардың қисық-сызықтылығынан зәкір реакциясымен сипатталатын ($I_{в.ном}$ қоздыру тогы кезінде осы кесіндінің ұзындығы $C_1 S_1'$) индуктивті кедергідегі $I x_{ad}$ кернеудің төмендеуін анықтайтын тік кесінді ұзындығы өзгеріссіз қалады. Қоздыру тогы көп болған сайын, $I x_{ad}$ мәні аз болады, бұл қоздыру тогының артуы кезіндегі синхронды индуктивті кедергінің x_d төмендеуі туралы баяндалғанмен тура келеді (кедергі x_d -сі x_c тұрақты мәнінде x_{ad} кедергісінің өзгеру есебінен өзгереді).

11.7. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫ ҚОЗДЫРУ

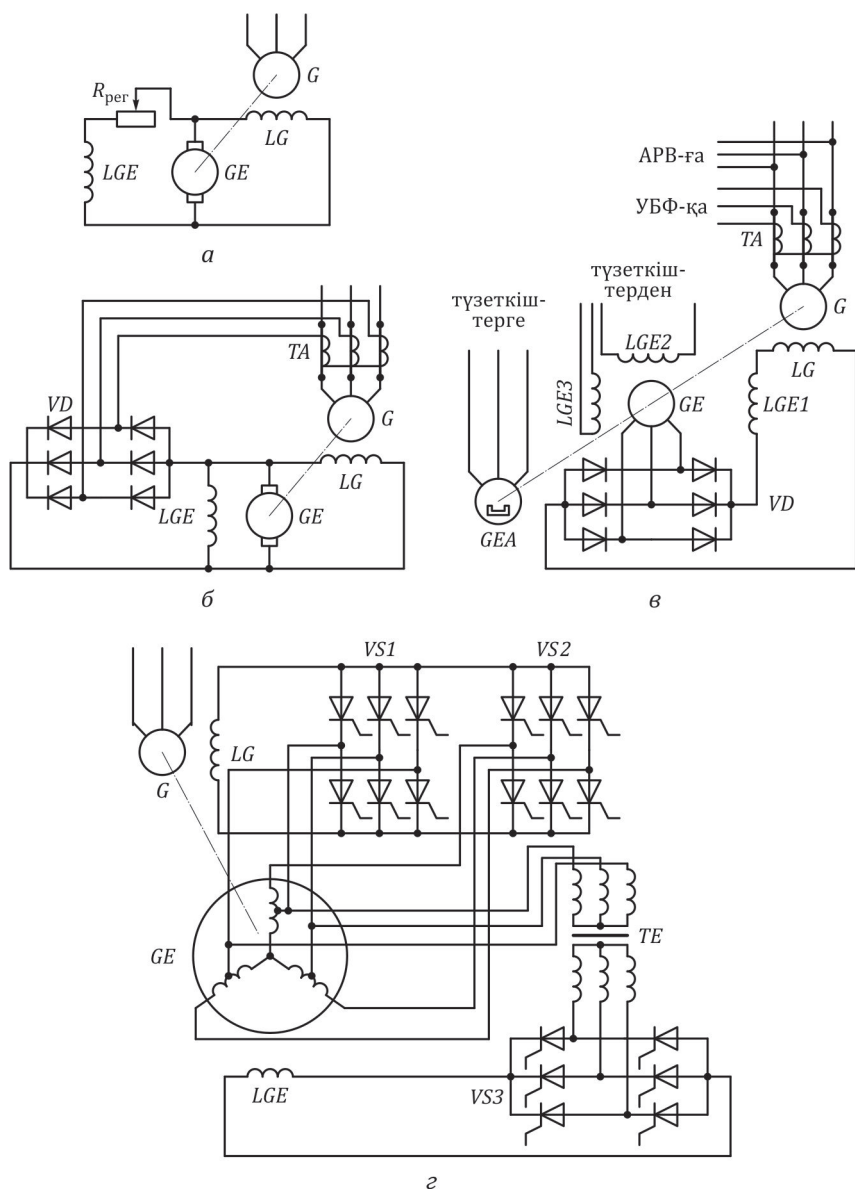
Қоздыру жүйелері туралы жалпы көзқарас. Синхронды генераторлардың ротор орамдары (қоздыру орамдары) қуат беру көзін өзіне қоздырғыштар деп аталатын тұрақты кернеу көздерінен алады. Қоз-

дырғыш қуаты генератор өндіретін қуаттың 0,3...3%-ын құрайды. Қуатты генераторлардың қоздыру тізбегінің кернеуі 650 В-тан аспайды. Қоздыру тогын реттей отырып, синхронды генератор ЭҚК-ін өзгертеді. Көмекші және реттеуші қондырғылардың *қоздырғыш жиынтығы* қоздыру жүйесі деп аталады.

Қоздыру жүйелері екі топқа бөлінеді: *тәуелсіз қоздыру жүйелері*, онда тұрақты кернеу көздері не тура қондырғылары бар ауыспалы кернеу көздері қолданылады және *өздігінен қозу жүйелері*, олар ток көзін негізгі синхронды генератордан бәсеңдетуші трансформаторлар мен түзулеткіш қондырғылары арқылы алады. Маңызды күйді аз қуатты *тұрақты магниттері* бар генераторлар алады, онда ротордың орамасы жоқ, тұрақты магнит болып саналады. Мұндай машиналарды шартты түрде өздігінен қоздыру генераторларына жатқызады, себебі, олар бөтен энергия көзін қажет етпейді.

Электр станцияларында орнатылған синхронды генераторлар параллельді жұмысқа қосылған. Параллельді жұмыстың ерекшеліктері 12 - бөлімде қарастырылады. Мұнда айта кетуге болатын жайт, генераторлардың қоздыруын реттеу олардың параллельді жұмысының тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Оның ішінде, қысқа тұйықталуларда орын алатын желідегі кернеудің терең төмендеуі кезінде параллельді жұмыстың тұрақтылығын сақтау үшін қоздыруды үдету, яғни жоғарғы мәнге дейін қоздыру кернеуінің тез артуы. Қоздыру жүйелерінің маңызды параметрлеріне үдету дүркінділігі жатады, яғни жоғарғы кернеудің $U_{\text{в.пот}}$ номиналдыға $U_{\text{ном}}$ қатынасы және қоздыру кернеуінің өсу жылдамдығымен анықталатын жылдам әсер ету. Турбогенераторлардың үдету дүркінділігі 2-ден кем болмау керек, ал гидрогенераторлардың дүркінділігі – 1,8-ден кем болмау керек. Турбогенераторлар мен гидрогенераторлардың қоздыру кернеуінің өсу жылдамдығы секундына $1,3 U_{\text{в.ном}}$ кем болмау керек. Алыс электр берілістеріне жұмыс істейтін қуатты гидрогенераторлардың үдету дүркінділігі 3.4 және қоздырудың өсу жылдамдығы секундына $10 U_{\text{в.ном}}$ дейін болуы керек.

Синхронды генераторлардың тәуелсіз электромашиналы қоздыруы (11.16, *a* суреті). Бірқатар кемшіліктері бар, бірақ, қазіргі уақытқа дейін қуаттылығы 100 МВт-қа дейінгі генераторлар үшін қолданылып келеді. Қоздырғыш ретінде бұл қоздыру жүйесінде тұрақты ток генераторы қолданылады, оның тірегі синхронды генератордың тірегімен қосылған (бұл жағдайда генераторлар бір тіректе



11.16.-сурет. Тәуелсіз коздырудың қысқартылған жүйелері:
a — тұрақты ток генераторының электромашиналығы; *б* — компаундтаумен бірге; *в* — көмекші индукторлы генераторды қолдана отырып жоғары жиілікті; *з* — тиристорлы

болады). Сызбанұсқада G әрпімен синхронды генератор белгіленген. Сызбанұсқадан көрінгендей, синхронды генератордың қоздыру орамасы LG болып қоздырғыш жүктемесі саналады GE (бұл белгідегі E әрпі excitation дегенді білдіреді— генератордың қоздыру). GE қоздырғышында параллельді қоздырғыш бар; оның қоздыру орамасы LGE деп білгіленген. 11.16, *а* суретінде электр машина қоздырғышының қарапайым сызбанұсқасы берілген, онда генератор қоздыруының кернеуін реттеу қоздырғыштың қоздыру тізбегінде $R_{\text{рег}}$ реттегіш реостатымен жүзеге асырылады. Қоздыруды үдету $R_{\text{рег}}$ кедергісін ұштастыру арқылы жүзеге асырылады, яғни оның шығымдарын нөлдік кедергімен тұйықтау арқылы (сызбанұсқада ұштастыру тізбегі көрсетілмеген).

Генератор кернеуін автоматты ұстап тұру үшін тұрақты деңгейде қоздыру жүйесі автоматты қоздыру реттегішімен толықтырылады, ол генератор шығымындағы кернеуге қоздыруға әсер етеді (қоздырудың автоматты реттегіштері энергия жүйелерінің автоматика жүйелерінде қарастырылады).

Қоздыруды компаундтау (11.16, *б* сурет). Синхронды генератордың тұрақтылығын арттыру үшін және ЭҚК автоматты реттелуін қамтамасыз ету үшін *қоздыруды компаундтау* керек. (тұрақты ток генераторлары үшін компаундтау және аралас қоздыру 2.5 бөлімінде қарастырылған). Синхронды генератор қоздырғышын компаундтау кезінде магнитті ағын автоматты түрде генератор зәкірінің тогымен автоматты түрде реттеліп отырады. Компаундтау тізбегіне TA ток трансформаторлары және VD үшфазалы диодты түзеткіші кіреді. Ток өзгергенде синхронды генератор зәкірінде LGE қоздыру орамасында GE электр машинасының қоздырғышының тогы өзгереді, соның салдарынан қоздырғыштың кернеуі және G синхронды генератор орамасындағы ток өзгереді.

Қоздыруды компаундтау генератор тогының өзгерісіне әсер ететінін байқауға болады, бірақ, кернеу мен қуат коэффициентінің өзгерісіне $\cos\phi$ әсер етпейді. Сондықтан да, генератор шиналарындағы кернеуді ұстап тұрады, егер ол өзгерсе ток бұл кезде өзгеріссіз қалады. Қуат коэффициенті өзгерген кезде кернеу қалыпты деңгейден тікелей ауытқуы мүмкін. Осы себептен компаундтау тізбегі, өз кезегінде, магнитті үдеткіш негізінде орындалған а в т о м а т т ы к о р р е к т о р л ы қ у а т берумен толықтырылады.

Электр машиналарының қоздырғыштары бар қоздыру жүйелерінің бір кемшілігіне желідегі кернеудің терең төмендеуі жағдай-

ында қоздыру тогының жоғары емес өсу жылдамдығы жатады.

Басқа кемшілікке жоғары айналым жиілігі бар турбогенераторлар жатады. Ол щетка мен коллектор жұмыстарының ауыр шарттары мен діріл салдарынан электр машиналы қоздырғыштардың сенімділігінің аздығымен сипатталады. Қуатты генераторларда (150 МВт-тан жоғары) қоздыру қуаты біршама маңызды саналып, сенімді қоздырғышты орындау қиындай түседі - 3000 айн/мин айналым жиілігімен тұрақты ток генераторы. Қоздырғыш жұмысының сенімділігінің арту мәселелерін шешудің біріне механикалық релюктордың көмегімен оның айналым жиілігінің төмендеуі жатады, алайда қосымша механикалық берілу қоздыру жұмысының кемшілігі болып табылады.

Көмекші индукторлы генераторды қолдана отырып тәуелсіз қоздыру жүйесі (11.16, в сурет). Қоздырудың ең жетілген жүйесі көмекші машина ретінде жоғары жиілікті индукторлы синхронды генераторды қолдануға негізделген.

Ескерту. Индукторлы генератор — айнымалы токтың электр машинасы, оның роторында орама болмайды, яғни сырғыма байланыстары болмайды. Зәкірдің үшфазалы орамасы мен қоздыру орамасы статорда орналасады. Ферромагнитті ротор тісті болып келеді. Мұндай ротордың айналуы кезінде ауыспалы ЭҚК алуға қажетті қоздыру орамасының магнитті ағынының өзгеруі жүреді. Сырғыма байланыстардың болмауы жоғары жиілікті машинаны орындауға мүмкіндік береді.

G негізгі синхронды генератордың қоздырғышының рөлін атқаратын *GE* индукторлы генератор тірегі соңғының тірегімен қосылған. Индукторлы генератор 3000 айн/мин айналым жиілігінде 500 Гц жиілікпен кернеу өндіреді. Көмекші генератордың кернеуінің жоғары жиілігі қоздырғыш жүйесінің жылдам әрекет етуін арттырады.

GE генераторы статорына үш қоздыру орамасын салады. Олардың біреуі (*LGE1*) біртіндеп диодты түзеткішпен *VD* және негізгі синхронды генератордың *LG* қоздыру орамасымен біріккен. Қысқа тұйықталу кезінде энергия жүйесінде қоздыру орамасының біртіндеп бірігуі ротордағы токтың бірден секіруі көмекші және негізгі генераторлардың қоздыру тогының бірден артуына алып келеді.

Индукторлы генератордың екі басқа орамдарын (*LGE2* және *LGE3*) түзеткіштер арқылы *GEA* қосалқы қоздырғышынан алады.

Қосалқы қоздырғыш — G негізгі генераторы GE қоздырғышы болып табылатын генератор (GEA белгісіндегі A белгісі additional — қосымша). Қарастырылып отырған GEA қоздыру жүйесі — бұл тұрақты магнитті көрсететін ротор генераторы және онда индукторлы генератордағыдай сырғыма байланыстар болмайды. Бұл қосалқы қоздырғыштың кернеу жиілігі 400 Гц тең.

$LGE2$ орамасының ток қоздырғышы қоздырудың автоматты қоздырғышымен реттеледі (ABP), ал $LGE3$ орамасының ток қоздырғышы байланыссыз қоздыруды үдету (БҚҰ) қондырғысымен реттеледі.

ABP қондырғысымен басқарылатын кернеу G негізгі генераторының шығымындағы кернеуге пропорционал болады (генератор мен ABP арасында сызбанұсқада көрсетілмеген кернеу трансформаторы қосылған). ABP өзінің қалыпты режимінде генератор кернеуін ұстап тұрады.

БҚҰ қондырғысымен басқарылатын ток генератор зәкірінің тогына пропорционал (ток БҚҰ-ке ТА ток трансформаторы арқылы түседі). БҚҰ генератордың бастапқы қоздыруын қамтамасыз етеді, ал қоздыру үдеткішін кернеу төмендеген кезде 5 % болады.

Жоғары жиілікті жүйені көмекші индукторлы генератормен қолданған кезде екіге тең қоздыру үдеткішінің дүркінділігіне жетеді және қоздыру кернеуінің өсу жылдамдығы секундына $2U_{в.ном}$ тең болады.

Тәуелсіз тиристорлы қоздырғыш жүйесі (11.16, 2 сурет). Ең жылдам әсер еткіш және екіден аса қоздыру үдеткішінің дүркінділігін алуға мүмкіндік береді. Бір тіректе G негізгі синхронды генераторымен бірге GE көмекші синхронды генераторы орналасқан. Келтірілген сызбанұсқадан көрінгендей, көмекші генератор статорының үшфазалы орамасында *орам бөліктерінің* кернеуін қолдануға мүмкіндік беретін аралық шықпалары бар. GE генераторының статор тізбегінде тиристорлардың екі тобы бар: $VS1$ қолданыстағы тобы және $VS2$ үдеткіш. Айнымалы ток жағында (яғни, көмекші генератор статорының орамасы жағында) тиристорлардың қолданыстағы тобы толық емес кернеуге қосылған, ал үдеткіш топ — толыққа қосылған. Тұрақты ток жағында тиристорлардың екі тобы параллельді қосылған және негізгі генератор қоздырғышының орамасына қосылған.

Генератордың қалыпты режимінде қолданыстағы топтың басқарушы электродтарына SI тиристорларды ашатын потенциал беріледі,

LG орамасы бойынша қоздыру тогы өтеді (сызбанұсқада тиристорлармен басқару тізбегі көрсетілмеген). Мұнда тиристорлардың үдеткіш тобы іс жүзінде жабық.

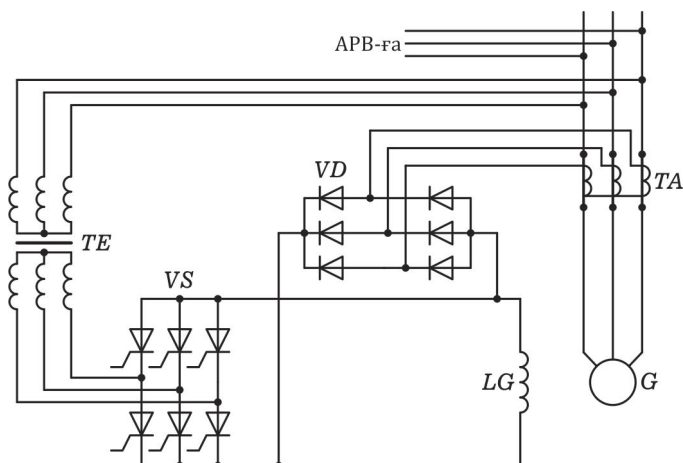
Қоздыру үдеткішінің режимінде көмекші генератордың толық кернеуінен қуат алатын *VS2* тобының тиристорлары толық ашылады және үдету тогын береді. Мұнда тиристорлардың қолданыстағы тобы үдеткіш топтың ең жоғары кернеуімен жабылады.

GE көмекші генераторы өздігінен қоздыру генераторы болып табылады. *LGE* қоздыру орамасы осы генератордың статор орамасының бөлігінен *TE* төмендеткіш трансформаторы және *VS3* тиристорлы тобы арқылы қуат алады.

Щеткасыз қоздыру жүйесі. 3 кА аса қоздыру токтарында қоздыру генераторының айналмалы генераторына түсетін щеткалар мен сақиналар арасында сырғыма байланыстар сенімсіз болады. Бұл кемшілік щеткасыз қоздыруды қолдану арқылы жүзеге асырылады. Қоздыру орамасын негізгі генератормен қуат беретін көмекші синхронды генераторда айнымалы ток (зәкірлі орам) орамасы статорда емес, *роторда* орналасқан. Көмекші генератор негізгімен бір тіректе орналасқан. Көмекші генератордың зәкірлі ротор айналымынан жартылай өткізгішті түзеткіш арқылы қоздыру орамасы болып табылатын негізгі генератордың орамасына келіп түседі. Түзеткіш генераторлар роторларымен айналады, сондықтан да бұл тізбектің сырғыма байланыстары болмайды. Көмекші генератордың қоздыру тогы қосалқы қоздырғыштан статорда орналасқан қоздыру орамасына келіп түседі. Негізгі генератордың қоздыру тогын реттеу көмекші генератордың қоздыру тогын өзгерту арқылы жүргізіледі.

Жартылай өткізгішті өздігінен қоздыру жүйесі (11.17 - сурет). Қоздыру жүйелерінің сенімділігі аз, себебі олардың жұмысы желі режиміне тәуелді. Өздігінен қоздыру қалдық магнитті ағын есебінен жүзеге асырылады (тұрақты токтың өздігінен қоздыру генераторы 2.4 бөлімінде сипатталған). Синхронды генератордың жартылай өткізгіштікті жүйесінде басқарылмайтын шұралар (диодтар) *VD* ток көзін *TA* ток трансформаторларынан алады, олардың қайталама тогы *G* синхронды генератор тогына генератор шығымында пропорционал (тиристорлармен басқару *APB* автоматты қоздыру реттегішімен жүзеге асырылады). Осылай, қоздыру орамасы бойынша жүретін токқа генератордың тогы да, кернеуі де әсер етеді.

VD диодты тобы генераторды қоздыруды жүктеме жұмысы кезін-



11.17.-сурет. Жартылай өткізгішті өздігінен қоздырудың қысқартылған сызбанұсқасы.

де қамтамасыз етіледі, сонымен қатар қысқа тұйықталу кезіндегі қоздыру үдеткішін де қамтамасыз етеді. *VS* тиристорлы тобын бос жүрісіндегі генератор қоздырғышы құрады және қалыпты режимдегі қоздыруды реттеуде қолданылады.

Тәуелді электр машинасының жүйесі. Электр станцияларында қоздырудың резервті көзі ретінде қолданылады. Қоздырғыш агрегаты құрамына кіреді:

- асинхронды қозғалтқыш, ток көзін төмендеткіш трансформатор арқылы синхронды генератордан алады;
- қоздырғыш — асинхронды қозғалтқышпен бір тіректе орналасқан және синхронды генератормен механикалық байланыспаған параллельді қоздырудың тұрақты ток генераторы;
- ток көзіннен қуат алатын синхронды генератордың қоздыру орамасы.

Электр машинасының болғанына қарамастан қоздырудың мұндай жүйесі тәуелсіз саналады, себебі асинхронды қозғалтқыштың қуаттануы негізгі генератор арқылы жүзеге асырылады.

Синхронды генератор жұмысы кезінде олардың орамаларының қызуы пайда болады, сонымен қатар статор мен ротордың қызуы жүреді. Орамдардың рұқсат етілген температуралары оқшауланған материалдар мен қоршаған орта температурасына байланысты 100°C және одан жоғары болуы мүмкін. Шектен асқан температуралар қызуы кезінде оқшаулау негіздерінің жылдам нашарлайды (ескіреді). Қызуды тоқтату үшін синхронды генераторларға жасанды салқындату қолданылады.

Орамдардан жылуды бөлу тәсілі бойынша жанама және тікелей салқындату деп екіге бөліп қарайды. *Жанама салқындау* кезінде салқындалатын ауа мен сутегі алдын ала қарастырылған желдеткіш арналар және магниттелмеген саңылау арқылы айдалады, ол үшін ротор кіре берісінде желдеткіштер орнатылады. Мұнда оқшаулау арқылы жүреді. *Тікелей салқындату* кезінде салқындатушы газ немесе сұйықтық өткізгіштермен тікелей жанасады. Қолданылатын салқындатушы зат бойынша салқындау жүйесі әуе, сутекті, сұйықтықты және әуе-сұйықтық болып бөлінеді.

Әуе салқындауының ағынды жүйесі қуаты аз генераторларда қолданылады: 2 МВ·А дейінгі генераторларда; 4 МВ·А дейінгі гидрогенераторларда. Машина генератор арқылы айдалады; мұнда орамдар оқшаулағышы жылдам ластанады, ал бұл генератор қызметінің мерзімін қысқартады.

Әуе салқындауының тұйықталған жүйесі тікелей 12 МВ·А дейінгі қуатта қолданылады. Бұл жүйеде ауаның сол бір көлемі тұйықталған шеңбер бойынша айналады. Ауа құбырлары бойынша ауа айдалатын ауа салқындатқышта салқындалады. Салқындатылған ауа машинаға роторда орнатылған желдеткіштермен айдалады.

Турбогенератордың белсенді бөлігінің айтарлықтай ұзындығында салқындау тиімділігі желдеткіштің көп құймалы радиалды жүйесін қолдану арқылы артады. Салқындау жүйесі бөліктің қатарларына тік жазықтықтармен бөлінеді. Әр бөліктің әуе саңылауы арқылы немесе арнайы осьтік арна арқылы беріледі, одан кейін ол радиалды желдеткішті арналар арқылы өтіп, шығарушы камераларына кетеді. Шығып кеткен ауа шығындарын өтеу үшін, қосым-

ша ауа суық ауа камерасында орнатылған майлы фильтрлер арқылы салқындау жүйесіне келіп түседі.

Жанама сутектік салқындату әуеліктен тиімдірек, себебі сутек ауаға қарағанда жылу беру коэффициенті 1,5 есеге көп болады және жылу өткізгіш коэффициенті 7 есеге дейін көп болады (жылу берілу коэффициентін жылу өткізгіштік, конвекция және сәулелену жолымен жылу алмасу интенсивтілігін анықтайды, ал жылу өткізгіштік коэффициенті молекулалардың жылулық қозғалысымен сипатталатын кондуктивті жылу алмасумен ескеріледі). Онымен қоса, сутектің айтарлықтай аз тығыздығы ауамен салыстырғанда желдеткіштік шығындарды 10 есеге дейін азайтуға мүмкіндік береді, бұл генератор КПД-сын шамамен 1 %-ға арттыруға алып келеді. Сутек ортасында оқшаулану тотығуының болмауы оқшаулану мерзімін арттыратыны да маңызды. Ақырында, сутек жанбайтындықтан өрт сөндіру құралдарына қажеттілік туындамайды. Алайда, сутектің ауамен қоспасы болса жарылыс қауіпті болады, сондықтан да сутектік салқындатуы бар машиналарда генератор корпусының газ өткізбейтіндігі қамтамасыз етіледі. Корпусты сутекпен толтырғанда улы қоспаның түзілуінен аулақ болу үшін, ауа алдымен көмірқышқыл газымен ығыстырылады.

Жанама сутектік және жанама әуелік салқындау кезіндегі желдету сызбанұсқалары ұқсас келеді. Айырмашылығы мынада, яғни салқындатушы сутектің көлемі генератор корпусымен шектеледі, сондықтан да салқындатқыштар тікелей корпуста тұрады. Сутектік салқындау тиімділігі артық газ қысым артқан кезде көбейеді. Оған қоса, артық қысым генератор корпусында ауаның енуіне кедергі келтіреді. Алайда, қысым қатты артқанда тығыздалу қамтамасыз етіледі. Әдетте, артық қысымды 0,4...0,6 МПа дейін жүргізеді (қалыпты атмосфералық қысым 0,1 МПа құрайды).

Жанама сутекті салқындауы бар генераторлар ауа салқындаған кезде де жұмыс істеуі мүмкін, бірақ ол кезде олардың қуаты азаяды.

Тікелей сутектік салқындату жанамалыққа қарағанда өте тиімді, орамдардың өткізгіштері қуысты және сутек өткізгіштердің ішіне беріледі. Тікелей сутектік салқындатуы бар генераторлар әуелік салқындатуда жұмыс істей алмайды, себебі бұл жағдайда орам қызып кетеді.

Генераторлардың *тікелей сұйықтық салқындатуы* кезінде салқындатқыш сұйықтық ретінде дистилденген су немесе кабельді май қолданылады. Бұл заттар сутекке қарағанда жылу өткізгіштің қабілеті жоғары, оған қоса дистилденген суда майға қарағанда жылу өткізгіштік қабілеті жоғары. Көп жағдайда қуатты генератор-

лар сулы салқындатумен жүргізіледі. Алайда, майлы салқындатуды қолдану орамның кернеуін 110 кВ-қа дейін арттыруға мүмкіндік береді (майдың электр төзімділігі суға қарағанда жоғары) және сонда генератор желіге аралық трансформациясыз қосылуына болады. Салқындатқыш сұйықтық тікбұрышты қиылысқан қуысты мыстан жасалған өткізгіштер бойынша айналады.

160 до 800 МВ·А қуатты турбогенераторларда статор орамасын сумен салқындату ротор орамасын тікелей салқындату және белсенді болатты сутекпен салқындатуды үйлестіре отырып қолданылады. Статор орамасын сумен салқындату қуаты тік гидрогенераторларда да қолданылады; мұндай генераторлардың роторы мен белсенді болатында әуе салқындатқышы бар. Капсулалы гидрогенераторларда статор мен ротор орамасына сулы салқындату қолданылады.

Алдында айтылған салқындату жүйелерінің барлығында салқындатушы зат *сұйық гелий* болып саналатын перспективті жүйе ерекшеленеді. *Криогенді генераторлар*, немесе криогенераторлар деп аталатын сұйық гелий бар генераторларды енгізу жаңа энергетиканың туылуы болып саналады. Негізінде, сұйық температура кезінде генератор орамасы өткізгіштігі артады. Бұл генератордың қуатын 2 есеге көтеруге септігін тигізеді. Пайдалы әрекет коэффициенті өседі, ал өндірілетін электр энергиясының құны төмендейді.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электр энергиясын неліктен тікелей айнымалы ток энергиясы түрінде өндіреді?
2. Синхронды генератордағы статор мен ротордың қызметтері қандай?
3. Үшфазалы синхронды генератордың жұмыс істеу қағидасын түсіндіріңіз. Генератор полюстерінің саны өндірілетін кернеу жиілігі мен ротордың айналым жиілігімен қалай байланысты?
4. Синхронды генератор түрлерінің жіктелуін келтіріңіз. Генератор конструкциясы генератор үшін қозғалтқыш болып саналатын турбина ерекшеліктерімен қалай байланысқан?
5. Синхронды генератордың нәтижелі магнитті ағыны неге тәуелді? Синхронды генератор зәкірінің реакциясы тұрақты ток генераторының зәкір реакциясымен салыстырғандағы ерекшеліктері қандай?
6. Бойлық және көлденең зәкір реакциясы дегеніміз не? Зәкір реакциясына тиесілі айқын полюсті және айқын емес полюсті генераторлар қасиеттерінің айырмашылығы неде?

7. Белсенді, индуктивті және сыйымдылықты жүктемелерде синхронды генератор зәкірінің реакция ерекшелігі қандай? Қандай жағдайда және не себепті генератор шығымдарындағы кернеу жүктеме кезінде генератор ЭҚК-нан аспауы керек?
8. Синхронды генератор кернеуінің теңдеуін жазып беріңіз. Теңдеуге кіретін шамалардың мағынасын түсіндіріңіз.
9. Синхронды генератордың векторлық диаграммасын сызыңыз. Конструкциясын түсіндіріңіз, векторлар арасындағы бұрыштарды түсіндіріңіз. Айқын полюсті және айқын емес полюсті генераторлардың векторлық диаграммалары қалай ерекшеленеді?
10. «Бойлық (көлденең) ось бойынша синхронды индуктивті кедергі» термині нені білдіреді? Синхронды индуктивті кедергіде кернеудің төмендеуі кіретін синхронды генератордың түрленген векторлық диаграммасын сызыңыз.
11. Белсенді, индуктивті және сыйымдылықты энергия қабылдағыштарын генератормен қуат беру кезінде құрылған сыртқы синхронды генераторлардың, сонымен қатар реттегіш және жүктеме сипаттамаларының айырмашылығын түсіндіріңіз.
12. Қысқа тұйықталу сипаттамасы деп нені айтады? Бұл сипаттаманың ерекшеліктері неде? Үшфазалы, екі фазалы және бірфазалы қысқа тұйықталу режимдерінің айырмашылығы неде?
13. Қандай жағдайда генератор сипаттамалары бойынша синхронды индуктивті кедергі анықталады (қаныққан және қанықпаған мәндер)?
14. Қысқа тұйықталу арақатынасы қалай анықталады? Бұл параметр нені сипаттайды?
15. Индуктивті сөйілу кедергісі графикалық түрде қалай анықталады? Синхронды генератор үшбұрышы қалай тұрғызылады? Бұл үшбұрыштың жақтары нені көрсетеді?
16. «синхронды генератордың тәуелсіз қоздыру жүйесі», «өздігінен қоздыру жүйесі», «қоздыруды үдету» терминдерін түсіндіріңіз. Қоздыру үдеткіші қандай параметрлермен сипатталады?
17. Синхронды генератордың электр машиналық мәні неде? Қоздырудың осы тәсілінің кемшіліктері неде?
18. Қандай мақсатта және қандай жағдайда қоздыруды компаундтау жүзеге асырылады?
19. Көмекші индукторлы генераторды, тиристорлы қоздыру жүйелерін, щеткасыз қоздыру жүйелерін қолдана отырып қоздыру жүйелерінің мәні неде.
20. Синхронды генераторлардың жартылай өткізгіштікті өздігінен қоздыру, сонымен қатар тәуелді электр машиналық қоздыруы қалай жүзеге асырылады?
21. Синхронды генераторларды салқындатудың қандай тәсілдері сендерге белгілі? Салқындатудың әр түрлі тәсілдерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін көрсетіңіз.

СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫҢ ПАРАЛЛЕЛЬДІ ЖҰМЫСЫ

12.1. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫ ПАРАЛЛЕЛЬДІ ЖҰМЫСЫНА ҚОСУ

Қуатты желісі бар параллельді жұмысына генераторды қосу шарты. Параллельді жұмысқа арналған бірнеше синхронды генераторларды электр станцияларында орнатады. Ауыспалы жүктелім кестесінде, әрқайсысы номиналды немесе осыған жақын жүктелім жұмыс есебімен жекеленген машиналарды параллельді қосу немесе өшіруі тиімді болады. Генераторлардың параллельдік жұмысы тұтынушылардың сенімділігін және үздіксіз электр жабдықтауын арттырады, сондай-ақ аз резервті қуаттылығын қамтамасыздандыруға мүмкіндік туындатады.

Генератордың қуатты желінің параллельдік жұмысына қосылу шартын қарастырғанда, басқа сөзбен айтқанда жұмыс жасап тұрған бірнеше генераторлармен бірлескен жұмысына; осы ретте жалпы жұмыс жасап тұрған генераторлардың қуаттылығы қосылған генератордың қуатынан едәуір басым болады. Бұл жағдайда генератордың қосылуы іс жүзінде жалпы шиналардағы кернеуді өзгертпейді. Қосылатын генераторда едәуір электрмеханикалық өтпелі үдерістерді болдырмау үшін, келесі шарттарды ұстану қажет.

Бірінші шарт. E_0 генераторының ЭҚК әрекеттік мәні U_c желі кернеуінің әрекеттік мәніне тең болуы қажет.

Екінші шарт. ЭҚК генератор фазасымен қосылу сәтінде желі кернеуінің фазасымен сәйкес келуі тиіс.

Үшінші шарт. f_r генераторының ЭҚК жиілігі желінің f_c кернеуіне сәйкес болуы қажет.

Төртінші шарт. ЭҚК генератор фазасының реттілігі және желінің кернеуі сәйкес болуы қажет.

Аталған шарттарды генератордың тұрақты токтың параллельді жұмысына қосылу шартымен салыстыру пайдалы (тараудың 2.6 бөлігін қараңыз). Келтірілген бірінші және екінші шарттарға тұрақты ток генераторы (генератор шарттарына тиісті бірінші және

екінші шарттары сәйкес келеді.

Синхронды генератор үшін тұжырымдалған екінші шарт түсінік-темені талап етеді. Фазалардың үйлесуі - генераторды желінің параллель жұмысына қосу алдында А генераторы шықпасы мен А шинасы арасындағы кернеуі нөлге тең болу қажеттігін (генераторлардың тұрақты ток жағдайында осы шарттағы «+» қысқыштарына барлық генераторларды бір жалпы шинаға, ал «-» қысқыштарының басқасына қосылу сәйкестігін) көрсетеді. Желі және генератордың кернеуі фазаларының үйлесуі туралы айтылғанда, бір жағынан параллельді қосылған барлық генераторлармен өткізгіштердің тұйықталған түйісін және басқа жағынан олардың жалпы жүктелімін қарастырады. Егерде бір жағынан құралған қосылатын генератор өткізгіштерінің тұйықталған түйісі және басқа жағынан – қалған барлық параллельді жұмыс атқарып тұрған генераторларды қарастырса онда генератордың және желінің қарама-қарсы фазалары туралы айтылуы керек.

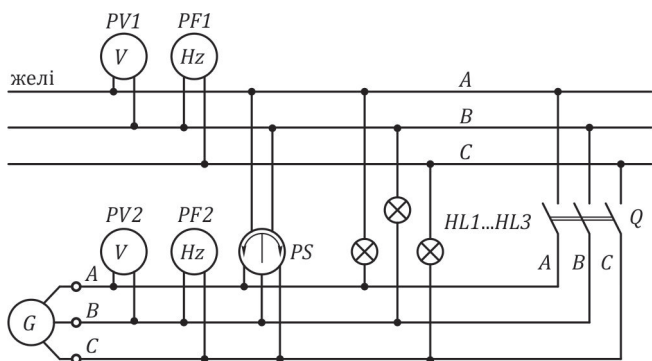
Алдында келтірілген үшінші және төртінші шарттар айнымалы токтың үш фазалы машинасына қатысты және тұрақты ток генераторларының параллельді жұмысына қосылу шарттарында болмайды.

Синхрондау дегеніміз желімен параллельді жұмысына қосылуға алдын болатын рәсімін қамсыздандыруын (осы немесе басқа дәрежеде) орындайтын жоғарыда аталған жағдайлар. Ағымдағы уақытта осы рәсімді жүзеге асыру үшін автоматтандырылған кішігірім *синхрондау* үдеріс-орлар қолданылады. *Дәл синхрондау* және *өздігінен синхрондау* болып өзгешеленеді.

Дәл синхрондау. Синхрондау үдеріс маңыздылығын анықтау үшін оның автоматтандырылған құрылғыларсыз қолмен атқарылатынын қарастырамыз. Дәл синхрондауды орындау барысында алдында аталған барлық төрт шарттың орындалуына қол жеткізіледі.

PV1 және *PV2* (12.1 сурет) вольтметрлердің көмегімен *PV1* және *PV2* (12.1 сурет) немесе қайта қосатын бір вольтметрдің бос жүріс режимінде жұмыс атқаратын қосылатын *G* генераторының шықпасындағы кернеуді және желінің кернеуін өлшейді. Қосылатын генератордың қоздыру тогын күйге келтіруде бірінші шарттың орындалуына генератордың желімен параллель жұмысының қосылуына қол жеткізеді (сұлбада қоздыру орамы және реттеуіш құрылғы көрсетілмеген).

PF1 және *PF2* жиілік өлшегіші немесе бір жиілік өлшегіші көмегімен желінің кернеу жиілігін және қосылатын (ЭҚК) генератордың



12.1.-сурет. Дәл синхрондауды орындау құралдары.

жиілік кернеуін өлшейді.

Қосылатын генераторы жетек қозғалтқыштың айналу кезеңін күйге келтіруде жиілік теңдігінің жуықтылығына қол жеткізеді (үшінші шарт). Бірақ, екінші шарттың орындалуына қол жеткізу үшін, желі кернеуінің фазасына қатысты (ЭҚК) қосылатын генератордың кернеу фазасы баяулап өзгеру үшін жиіліктер біршама өзгеру қажет.

Екінші шарттың орындалуына электромеханикалық немесе *PS* электронды синхроскоп қолданылады және қайталама ретінде *HL1*, *HL2*, *HL3* лампаларынан құралатын лампалы синхроскоп.

Бағыттамалы электромеханикалық синхроскопта айнымалы магниттік өрісті қалыптастыратын үш фазалы ток жүйесі қолданылады. Синхроскоптың бағыттамасы желі және қосылатын генераторы жиілік кернеуінің айырымына үйлесімді жылдамдығымен айналады. Егерде қосылатын генератордың желі кернеуінің жиілігі желі кернеуінің жиілігінен жоғары болған жағдайда көрсеткіш «жылдам» бағытында, ал кері жағдайда – «баяу» бағытында айналады. Бастапқы қозғалтқыштың айналдыру жиілігін реттеуде синхроскоп бағыттауышының өте баяу айналуына қолжеткізеді. Синхроскоп көрсеткіші тік қалпын қабылдау кезінде, генератор желіге *Q* ажыратқышымен қосылуы ықтимал. Осы сәтте үшінші шарты орындалады: генератордың *A*, *B* және *C* потенциалдарының шықпасы желі шинасының *A*, *B* және *C* потенциалына сәйкесінше тең болады.

Сонымен қатар, синхроскоп генератордың параллель жұмысына қосылуға төртінші шартты тексеру мүмкіндігіне жағдай жасайды: егерде генератордың кернеу жиілігі желінің кернеу жиілігінен айқын төмен болса, ал синхроскоп көрсеткіші «жылдам» бағытына қарай ай-

налса (немесе керісінше, генератордың кернеу жиілігі желі кернеуінен жоғару болып, көрсеткіш «баяу» айналса), онда генератор фазасының реттілігі желі фазасына сәйкес келмейді.

12.1 - суретте көрсетілген л а м п а л ы с и н х р о н о с к о п , «сөндірілу» сұлбасы бойынша қосылған: *HL1* лампы *A* генераторының шықпасымен және *A* желісі арасында қосылған; *HL2* лампы — *B* генераторының шықпасымен және желінің *B* шинасы арасында қосылған; *HL3* лампы — *C* шықпасы және *C* шықпасы аралығында. Генератор кернеуінің жиілігі және желінің біртекті емес жағдайында синхроскоптың әр лампында айнымалы периодты кернеу болады Δu лездік мәні нөлден желінің $2U_{cm}$ екі есе амплитуда кернеуіне дейін өзгереді және лампылар бірізетте жылтылдайды. Δu нөлге тең болып және лампылар сөнген жағдайда, генераторды желіге Q ажыратқышымен қосу үшін «синхрондау кезі» қолайлы сәті болып табылады.

«Жарықтың айнала қозғалуындағы» сұлбасында *HL1* лампы «сөндірілуге» сұлбасындағыдай *A* генераторының шықпасы және *A* желісінің шинасы арасында қосылады; енді *HL2* лампы *B* генераторының шықпасы және *A* желісінің шинасы арасында, ал *HL3* - лампы *C* шықпасы және *B* шинасы арасында қосылады. Осы жағдайда Q ажыратқышын қосқанға дейін лампылар кезектесіп жанып және өшіп жарық айналымы әсерін құрады. *HL1* лампы генератор және желінің аттас шықпасы арасында қосылған синхрондау сәті туындайды, сөнеді, ал басқа екі лампа бірдей қызумен жанып тұрады.

Қызу шамы кесімді 25% төмен кернеу барысында көрінетін жарық әсері болмайды, сол себепті лампы синхроскоп жәрдемімен синхрондау сәті 15...25 электрлі градусқа кате орындалуы мүмкін. Айрымдардың жоғалу сәтін дәлірек белгілеуде лампаға параллельді бір аттас шықпаларға қосылған вольтметрді қолданады.

Егерде лампылық синхроскоп «сөндірілуге» сұлбасы бойынша жасалып «жарықтың айналуы» болған жағдайда желі фазасының өтуі генератор фазасының өту тәртібімен сәйкес келмейді. Фазалардың өту тәртібінің сәйкессіздігі лампы синхроскоптың «жарықтың айналуы» сұлбасы бойынша жасалғаны және лампылардың бір уақытта жанып-сөнуі байқалады. Осындай жағдайда генераторды желіге қосуға болмайды. Желі және генератор фазалары бірізділігін бір келкі етіп жасауда генератордан Q ажыратқышына баратын екі сымның орнын ауыстыру қажет.

Сонымен қатар, фазалардың бірізділігін анықтауда ф а з а к ө р -

сеткіші қолданылады.

Өздігінен синхрондалу. Синхрондау әдісімен желімен синхронды генераторды параллельдік жұмысқа қосу үшін, тек қана бір шартты орындау қажет - көрсеткіші немесе синхроскоптың көмегімен, қосылатын генератор мен желінің біркелкі фаза реттілігін орындау қажет.

Өзін-өзі синхрондау әдісін қолданған кезде, генератордың қоздыру орамасы қуат көзінен ажыратылуы тиіс және қоздыру орамасының кедергісін 5-10 есеге асатын белсенді қарсылыққа дейін жабылу керек. (Егер қоздыру орамасы ашық болса, онда статор орамасын желіге қосу кезінде ораманы оқшаулаға және техникалық қызметкерлеріне қауіпті болатын маңызды ЭҚК индукцияланады.)

Генерацияланбаған генератордың роторы бастапқы қозғалтқышпен синхрондыға жақын жылдамдықпен басқарады, одан кейін зәкірдің (статордың) орамасын желіге қосады. Содан кейін қоздыру орамасын тұрақты кернеу көзіне қосады және генератордың зәкір тогы ең аз болатын қоздыру тогына орнатылады. Генератор *синхронизмге ұшырайды*, яғни ол желімен орнатылған синхронды жылдамдықпен айнала бастайды және бұл өздігінен синхрондау үдерісін аяқтайды. Өзін-өзі синхрондау әдісін қолданған кезде, қосылатын генератордың ЭҚК жиілігін және қосылатын ЭҚК жиілігін дәл қадағалау, сонымен қатар қосу кезеңін мұқият таңдау қажеті болмайды. Дегенмен, генераторды желіге қосқан кезде, зәкір орамасында номиналды токтан 3-тен 7 есе асатын ток пайда болу мүмкін.

12.2.

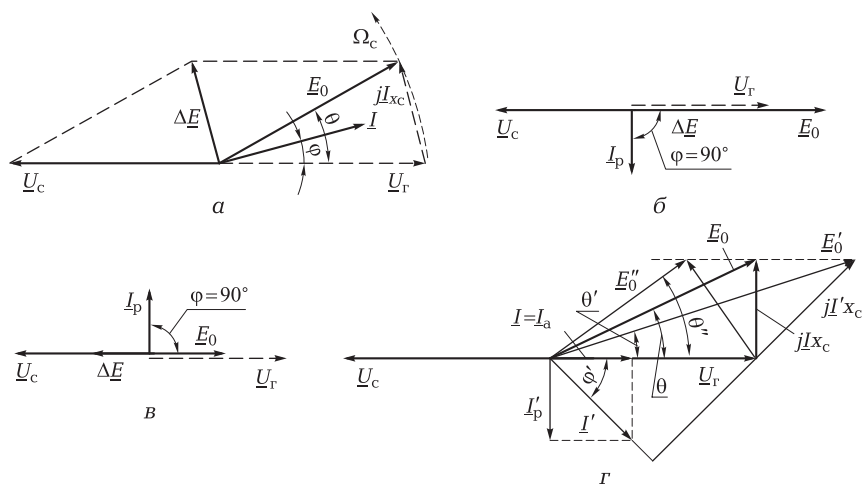
ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЖЕЛІМЕН ПАРАЛЛЕЛЬ ЖҰМЫС ІСТЕУІ

Генератордың бос жүріс режимінде жұмыс істеуі. Генераторды желімен қатар жұмысқа дұрыс қосқаннан кейін қосылған генератор зәкірінің орамасында ток болмайды, яғни генератор бос жұмыс істейді: ол желіге қуат бермейді және желіден қуат алмайды. E_0 генераторының ЭҚК бұл ретте оның U_r қысқыштарындағы кернеуге тең болады. Желіге қатар қосылған генератордың кернеуі өз кезегінде U_c желісінің кернеуіне тең болады. Одан әрі талдау кезінде генератордың кернеуі желінің кернеуіне синфазалы емес, фаза бойынша оған қатысты алғанда 180° бұрышқа ығысқан деп есептеу қолайлы. Фазаның мұндай ауытқуы бір жағынан қосылған генератор және екінші жағынан параллель жұмыс істейтін қалған барлық генераторлар жа-

сайтын контурды айналу кезінде орын алады (генераторды желімен қатар жұмысқа қосудың екінші жағдайына берілген түсіндірмені қараңыз, 12.1-бөлім). Мұндай жағдайда векторлық диаграммада $\underline{U}_c$ және $\underline{U}_r$ векторлары модуль бойынша бірдей және бағыты бойынша қарама-қарсы болып бейнеленеді.

Бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүшін өзгерту. Егер генератордың желісіне қосылған роторды айналдыратын бастапқы қозғалтқыштың қуатын арттыратын болса, M_1 айналдыру иінкүші туындайды. Осы иінкүштің әсерінен генератордың роторы Ω_c синхронды жиілікпен айналатын желінің магнитті өрісіне қатысты біршама жылдамдық алады. Бұл ретте роторға әсер ететін M тежегіш электрмагнитті иінкүш пайда болады. Тежегіш иінкүштің пайда болу себебі орамасынан қоздыру тогы өтетін ротор мен желінің жалпы кернеуі әрекет ететін статор электр магниттер болып табылатындығынан-ақ анық. Бір магнитті екінші магниттен алшақтатын сыртқы күшке магниттер арасындағы тартылыс күші қарсы тұрады.

M тежегіш иінкүші M_1 айналдыру иінкүшіне тең келген кезде ротор кеңістікте бос жүріс режимінде болған қалыпқа қатысты алғанда



12.2.-сурет. Желімен параллель жұмыс істейтін генератордың векторлық диаграммалары:

a — бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүші артқан кезде; $б$ — генератор қоздырылған және нөлдік белсенді қуат кезінде; $в$ — генератор жете қоздырылмаған және нөлдік белсенді қуат кезінде; $г$ — генератор әртүрлі қоздырылған және нөлдік емес белсенді қуат кезінде

біршама θ (эл. град.) бұрышқа ығысады және одан әрі Ω_c синхронды жиілікпен айналуы жалғастырады. Осылайша, егер бос жүріс кезінде E_0 генераторының ЭҚК векторы мәні мен бағыты бойынша $\underline{U}_r$ генераторының шықпаларындағы кернеудің векторына сәйкес келетін болса, айналдыру сәтін арттырған кезде $\underline{E}_0$ векторы ротормен бірге $\underline{U}_r$ векторына қатысты алғанда ротордың айналу бағытына қарай θ бұрышқа бұрылады, бұл 12.2, а суретінде көрсетілген ($\underline{U}_r$ векторы өз мәні мен бағытын өзгерте алмайды, өйткені ол қуатты желі кернеуінің векторымен тығыз байланыста).

Бос жүріс кезінде қаралып отырған генератор зәкірінің тогы нөлге тең болды, өйткені осы генератормен және желімен туындаған контурда қорытқы ЭҚК нөлге тең болды: $\underline{U}_c + \underline{E}_0 = 0$. Енді, генератордың ЭҚК векторы өз бағытын желі кернеуінің векторына қатысты алғанда өзгерткен жағдайда, зәкір орамасында I тогын тудыратын $\Delta \underline{E} = \underline{U}_c + \underline{E}_0$ нөлдік емес қорытқы ЭҚК пайда болады. Қуатты желі қаралып отырғандықтан, қатар қосылған генераторлардың жалпы кедергісін елемеге болады және сонда қаралып отырған генератор зәкірінің тогы негізінде оның хс синхронды индуктивті кедергісіне байланысты болады (қаралып отырған генератор зәкірінің орамасының белсенді кедергісін де елемейміз). Сонымен,

$$\Delta \underline{E} = \underline{U}_c + \underline{E}_0 = -jI x_c. \quad (12.1)$$

Плюсі анық емес генератордың векторлық диаграммасы (11.12-суретті қараңыз) жазылған теңдеуді түсіндіреді. 11.12-суретке сәйкес $\underline{U}_r = \underline{E}_0 - jI x_c$ және осы диаграммадағы $\underline{U}$ векторының генератор кернеуінің векторын көрсететіндігін ескере отырып: $\underline{U} = \underline{U}_r$. 12.2, а суретінде көрсетілген желі кернеуінің векторы оған қарама-қарсы: $\underline{U}_c = -\underline{U}_r$, сонда: $-\underline{U}_c = \underline{E}_0 - jI x_c$, осыдан теңдеу шығады (12.1).

(12.1) теңдеуіне сәйкес I зәкірі тогының векторы векторлық диаграммада (12.2, а суретін қараңыз) $\Delta \underline{E}$ векторына (және $jI x_c$ векторына) қатысты алғанда 90° артта қалу жағына бұрылып салынған. Екінші жағынан, I тогы фаза бойынша $\underline{U}_r$ генераторының кернеуінен ϕ бұрышына басып түседі. Генератор желіге $P_2 = m \underline{U}_r I \cos \phi$ белсенді қуатын береді; бастапқы қозғалтқыш тежегіш иінкүшті еңсеруге жұмсайтын механикалық энергия электр энергиясына ауысады (1.1 бөлімінде берілген (1.3) және (1.4) теңдіктері арасындағы пайымдаулармен салыстырыңыз). Бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүші неғұрлым көп болған сайын генератор желіге соғұрлым көп қуат береді.

Алайда айналдыру иінкүші генератор синхронизмнен шығып қа-

латын біршама шекті мәннен аспауы тиіс (12.4-бөлімді қараңыз).

Бос жүріс режиміне сүйене отырып қаралып отырған генератордың бастапқы қозғалтқышының айналдыру иінкүшін азайтатын немесе бастапқы қозғалтқышты мүлде сөндіретін болса, желінің үш фазалы кернеуімен қамтамасыз етілетін статордың айналып тұратын магнитті өрісі өзімен бірге роторды тартады. Бұл жағдайда генератор энергияны желіден ала отырып, қозғалтқыштың режимінде жұмыс істейтін болады (синхронды машинаның қозғалтқыш режимі 13.1-бөлімде қаралады).

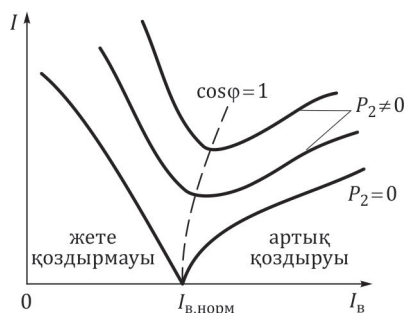
Сонымен, *бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүшін өзгерте отырып, синхронды машина желіге беретін белсенді қуатты реттеуге, сондай-ақ машинаны қозғалтқыш режиміне ауыстыруға болады.*

Тұрақты айналдыру иінкүші және нөлдік белсенді қуат кезінде қоздыру тогын өзгерту. Қайтадан бастапқы ретінде синхронды генератордың бос жүріс режимін қарастырамыз. Бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүшін өзгертпей генератордың қоздыру тогын арттыратын болса (яғни генератордың *қайта қозу режимін орнататын* болса), оның E_0 ЭҚК-сы артады (12.2, б суреті). Генератордың контурында әрекет ететін қорытқы ΔE ЭҚК модулі — желі генератордың ЭҚК модулі мен желі кернеуінің айырмасы ретінде анықталады ($\Delta E = E_0 - U_c$), бұл E_0 ЭҚК күші U_c кернеуіне қарсы фазалық, ал генератордың ЭҚК модулі желі кернеуінің модулінен асатын жағдайда (12.1) теңдігінде көрсетілген. Бұл ретте қорытқы ΔE ЭҚК күші E_0 генераторының ЭҚК күші секілді фазаға ие. Қорытқы ΔE ЭҚК күші фаза бойынша осы ЭҚК-дан 90° -қа артта қалатын зәкір тогын туғызады. Осы жағдайда бұл ток *генератордың кернеуінен* де 90° -ға артта қалады, яғни I_p реактивті ток болып табылады. Генератордың белсенді қуаты $P_2 = m U_r I_c \cos \varphi = m U_r I_c \cos 90^\circ = 0$, яғни қоздыру тогы өзгермеген жағдайда, қаралып отырған генератор мен желі арасында белсенді қуат бөлу үдерісі жүрмейді.

Артта қалатын I_p тогы генератор зәкірінің бойлық магнитсіздендіру реакциясын тудырады (11.3-бөлімді қараңыз). *Желінің кернеуіне* қатысты алғанда бұл ток озық болып табылады; ол барлық қалған генераторлар үшін зәкірдің бойлық магниттелген реакциясын тудырады.

Бос жүріс режиміне сүйене отырып, генератордың қоздыру тогын азайтатын болса (*жете қозбау режимін* орнату), E_0 генераторының ЭҚК-сы азаяды кемиді (12.2, в суреті). Қорытқы ΔE ЭҚК модулі $\Delta E = U_c - E_0$ ретінде анықталады, бұл ретте қорытқы ΔE ЭҚК күші E_0 ге-

12.3.-сурет. Синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамалары.



нераторының ЭҚК күшіне қарсы фазалық болады. Қорытқы ΔE ЭҚК фаза бойынша осы ЭҚК-дан 90° -қа артта қалатын, бірақ генератор кернеуінен 90° -қа озып түсетін зәкір тогын тудырады. Генератордың белсенді қуаты қайта қоздыру жағдайындағыдай нөлге тең болады.

I_p озыңқы тогы генератор зәкірінің бойлық магниттелген реакциясына негізделеді (11.3-бөлімді қараңыз). Желінің кернеуіне қатысты алғанда бұл ток қалған генераторлар үшін зәкірдің магнитсізденген реакциясын тудыра отырып артта қалатын болып табылады.

Егер қоздыру тогын өзгертіп, бұл ретте желімен қатар жұмысқа қосылған генератордың зәкір тогын өлшейтін болса, пішіні жағынан солай аталатын *генератордың U-тәрізді сипаттамасын* алуға болады— тәуелділігі $I(I_v)$. Нөлге тең белсенді қуат кезінде, U- тәрізді сипаттаманың қоздыру тогында нүктесі бар, өйткені қалыпты $I_{v.норм}$ деп аталатын біршама қоздыру тогы кезінде зәкір тогы нөлге тең (бос жүріс режимі). Қоздыру тогын арттыру және кеміту кезінде зәкірдің тогы таза реактивті бола отырып арта түседі. Бұл ретте белсенді қуат нөлге тең болады (12.3-суреттегі төменгі қисық).

Тұрақты айналдыру иінкүші және нөлдік емес белсенді қуат кезінде қоздыру тогын өзгерту. Бастапқы қозғалтқыштың айналдыру иінкүшін арттырайық. *Зәкірдің тогы неғұрлым аз мәнге ие болатындай етіп* қоздыру тогын реттейік. Бұл режимде генератор желіге таза белсенді қуат береді; генератор зәкірінің тогы фаза бойынша оның шықпаларындағы кернеуге сәйкес болады. 12.2-суретте ε мұндай режимге белгіленімдерінде сызықшалар болмайтын векторларды камтитын векторлық диаграмма сәйкес келеді (12.2, а-суретімен салыстыру керек).

Енді, айналдыру иінкүшін өзгертпей қоздыру тогын арттырайық (қайта қозудыру жағдайы). Бұл ретте зәкірдің тогы артады (12.2, ε суретіндегі I' векторы), бірақ I'_p реактивті құрамдас бөлік есебінен

ғана; I_a белсенді құрамдас бөлігі өзгеріссіз қалады. Егер айналдыру иінкүші өзгермесе, генератор желіге беретін белсенді қуат та өзгермейді. Белсенді қуат $P_2 = mU_r I \cos\varphi$ өрнегімен анықталады. Ол косулы тұрған желінің кернеуіне тең болатын U_r , генераторының шықпаларында кернеу өзгермеген жағдайда, зәкір тогының белсенді құрамдас бөлігі болып табылатын $I \cos\varphi$ шамасының мәні өзгермей қалуы керек. Зәкірдің тогы нөлдік емес белсенді қуат жағдайында секілді қайта қозу кезінде генератордың кернеуіне қатысты алғанда артта қалатын және желінің кернеуіне қатысты алғанда озыңқы болып табылады.

Зәкір тогының белсенді құрамдас бөлігінің тұрақтылығына осы токтың көлденең оське түсетін кескінінің тұрақтылығы сәйкес келеді. Басқа сөзбен айтқанда, қоздыру тогы өзгерген кезде зәкір тогы векторының ұшы тік түзу бойымен сырғиды. $j\vec{I}_x$ синхронды индуктивті кедергідегі кернеудің түсу векторы $\vec{I}$ векторына перпендикуляр, оны j жорамал бірлігі көрсетеді. Бұл жағдайда қоздыру тогы өзгерген кезде $j\vec{I}_x$ векторының ұшы (сондай-ақ $\vec{E}_0$ генераторының ЭҚК векторының ұшы) егер x_c мәні өзгермейді деп есептейтін болса, көлденең түзу бойымен сырғиды. Қайта қозуға сәйкес келетін векторлардың белгіленімдері 12.2, z суретінде бір сызықшамен берілген.

Жете қоздырылмаған жағдайда белсенді қуат пен зәкір тогының белсенді құрамдас бөлігі де өзгермейді. Бұл жағдайда I'' зәкірінің тогы U_r генераторының кернеуінен озып түседі және желінің кернеуінен артта қалады. Векторлық диаграммада $j\vec{I}''x_c$ векторына перпендикуляр болатын $\vec{I}''$ тогының векторы $\vec{U}_r$ генераторы кернеуінің векторына қатысты алғанда сағат тіліне қарсы бұрылады (12.2, z суретінде $\vec{I}''$ векторы суретті күрделендірмеу үшін көрсетілмеген).

Бұрын нөлдік белсенді қуат жағдайы үшін жасалғандай белсенді қуаттың әрбір мәні үшін U -тәрізді сипаттаманы салуға болады (12.3-суретті қараңыз). Әрбір сипаттаманың төменгі нүктесі (зәкірдің минималды тогының нүктесі) қалыпты қозуға сәйкес келеді, ол кезде зәкір тогының реактивті құрамдас бөлігі болмайды; бұл ретте зәкір тогы мен генератордың кернеуі арасындағы фазалардың ауытқуы $\varphi = 0$; $\cos\varphi = 1$. Егер барлық U -тәрізді сипаттамалардың қалыпты қоздыру нүктелерін біріктірсе, оң жаққа ауытқитын қисық шығады. Белсенді қуат артқан кезде орын алатын зәкір тогы артқан сайын зәкір реакциясының тасқыны мен шашырау тасқыны артады. Бұл ретте φ фазалық бұрышты өзгеріссіз сақтау үшін (нөлге тең етіп) осы тасқындарды полюстар тасқындарын арттыру арқылы

теңгеру қажет, ал ол үшін қоздыру тогын ұлғайту қажет.

12.3-суретте U-тәрізді сипаттамалардың оң жақ бөліктерінің сол жақ бөліктерге қарағанда жазықтау екендігін көруге болады. Бұл арттыратын қоздыру тогының азайту тогына қарағанда статор тогының аз өзгеруіне әкеп соғатындығын білдіреді. Оның себебі мынада: үлкен қоздыру тогы генератордың магнитті тізбегінің қанығуына әсер етеді.

Генератордың қуатты желімен параллель жұмысына қатысты жалпы қорытындылар. Қоздыру тогы мен айналдыру иінкүшінің дербес түрде жұмыс істейтін синхронды генераторға тигізетін әсерін осы факторлардың қуатты желімен параллель жұмыс істейтін генераторға тигізетін әсерімен салыстырып көрейік.

Дербес түрде жұмыс істейтін генератордың қоздыру тогын өзгертетін болса, оның ЭҚК-сы мен оның шықпаларындағы кернеу артады. Егер генератор *қуатты желімен параллель жұмыс істейтін* болса, қоздыру тогын өзгерткен кезде генератордың шықпаларындағы кернеу өзгеріссіз қалады және желінің кернеуіне тең түседі. Алайда генератордың ЭҚК-сы өзгермейді және бұл реактивті токтың пайда болуына әкеп соғады: ЭҚК артқан кезде бұл ток фаза бойынша генератордың кернеуінен артта қалады, ал ЭҚК кеміген кезде — генератордың кернеуінен асып түседі.

Егер *дербес* түрде жұмыс істейтін генератордың білігіндегі айналдыру иінкүшін арттыратын болса, айналу жиілігі және өндірілетін ЭҚК жиілігі де артады. Егер генератор *қуатты желімен параллель жұмыс істейтін* болса, айналдыру иінкүшінің артуы генератор желіге беретін қуаттың артуына әкеп соғады. Бұл ретте айналу жиілігі тіптен өзгермейді және ЭҚК жиілігі желі кернеуінің жиілігіне тең болып қалады.

Желімен параллель жұмыс істейтін генератордың айналдыру иінкүшін азайта отырып, оны қозғалтқыш режиміне ауыстыруға болады.

Қуаты бойынша өлшемдес екі генератордың параллель жұмысы. Егер қуаттары ұқсас екі генератор параллель жұмыс істейтін болса, бір генератордың қоздыру тогының өзгеруі жалпы шиналардағы кернеудің өзгеруіне әкеп соғады. Бір генератордың білігіндегі айналдыру иінкүшінің өзгеруі ол беретін қуаттың өзгеруінен бөлек екі генератордың айналу жиілігінің өзгеруіне, соның салдарынан кернеу жиілігінің өзгеруіне әкеп соғады. Жалпы шиналардағы кернеу жиілігін өзгертпей бір генератордан екінші генераторға жүктемені ауыстыру үшін жүктеме берілетін генератордың бастапқы қозғалтқышының айналдыру иінкүшін арттырып, жүктеме алынатын генератордың

бастапқы қозғалтқышының айналдыру иінкүшін азайту қажет. Шиналардағы кернеуді тұрақты деңгейде ұстап тұру үшін жүктеме берілетін генератордың қоздыру тогын арттырып, жүктеме алынатын генератордың қоздыру тогын азайту қажет. Бұл ретте сонымен қатар екі генератордың $\cos\varphi$ қуат коэффициентінің тұрақтылығы сақталады.

Осыны қуаты барлық генераторлардың жалпы қуатымен өлшемдес болатын аздаған генераторлар параллель жұмыс істейтін жағдай үшін қолдануға болады.

12.3. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЭЛЕКТРМАГНИТТІ ҚУАТЫ

Полюсі анық емес генератордың электрмагнитті қуатының теңдігін шығару. Басқа генераторлармен параллель жұмыс істейтін генератордың қасиеттерін одан әрі зерттеу үшін оның электрмагнитті қуаты неге байланысты болатындығын қарастырайық.

Синхронды генератордың энергетикалық диаграммасы тұрақты ток генераторының энергетикалық диаграммасына ұқсас (2.1-суретті қараңыз). $P_{эм}$ генераторының электрмагнитті қуаты — зәкірге ауа саңылауы арқылы берілетін тұтынылатын P_1 механикалық қуатының бір бөлігі. Электрмагнитті қуат, генератор ішкі желіге беретін P_2 пайдалы қуатынан $P_я$ зәкір орамасындағы электр шығын шамасына ерекшеленеді:

$$P_{эм} = P_2 + P_я = mU_r I \cos\varphi + mI^2 R_я$$

мұндағы m — машина фазаларының саны; U_r және I — тиісінше фазалық кернеу мен ток; φ — олардың арасындағы фазалардың ауытқу бұрышы; $R_я$ — синхронды генератордың статорында орналасқан зәкір орамасы фазасының кедергісі. Қуаты орта болатын машиналарда зәкірдегі электр шығындар пайдалы қуаттың 1 %-нан аспайды. Сондықтан мынадай қабылдауға болады

$$P_{эм} \approx mU_r \cos\varphi. \quad (12.2)$$

Одан әрі E_0 генераторының ЭҚК-сы мен оның U_r шықпаларындағы кернеу арасындағы θ фазалардың ауытқу бұрышы арқылы өрнектеу қажет болады. Ол өрнекті полюсі анық емес генератор үшін аламыз. θ фазалық бұрышқа электр градуспен өлшенетін, жүктеме кезіндегі ротордың орналасқан орны мен бос жүріс кезіндегі оның орналасқан орны арасындағы геометриялық бұрыш сәйкес келеді (12.2-бөлімді қараңыз). Полюсі анық емес генератордың векторлық диаграммасында (11.12-суретті қараңыз) $\underline{U} = \underline{U}_r$ векторына қарай eh

сәулесін салайық. Осы сәулеге b нүктесінен bh перпендикулярын жүргізейік. Төбесі b нүктесінде орналасқан hbe бұрышы салынуы бойынша зәкір тогы (статордың) мен генератордың шықпаларындағы кернеу арасындағы φ фазаларының ауытқу бұрышына тең болады. hbe тікбұрышты үшбұрышының be гипотенузасының ұзындығы $I x_c$ мәніне тең, мұндағы x_c — полюсі анық емес генератордың синхронды индуктивті кедергісі ((11.19) өрнегін қараңыз). Сонда φ бұрышына іргелес жатқан bh катетінің ұзындығы $I x_c \cos \varphi$ мәніне тең.

Екінші жағынан, bh кесіндісі θ бұрышына іргелес катет болып табылатын, ал гипотенуза E_0 мәніне тең болатын тікбұрышты үшбұрыштан $bh = E_0 \sin \theta$ көруге болады. Осылайша, $I x_c \cos \varphi = E_0 \sin \theta$ болады, $I \cos \varphi = \frac{E_0}{x_c} \sin \theta$. Соңғы өрнекті (12.2) теңдігіне қояйық, сонда осылайша ізделіп отырған электрмагнитті қуаттың теңдігін аламыз:

$$P_{эм} = m U_r \frac{E_0}{x_c} \sin \theta \quad (12.3)$$

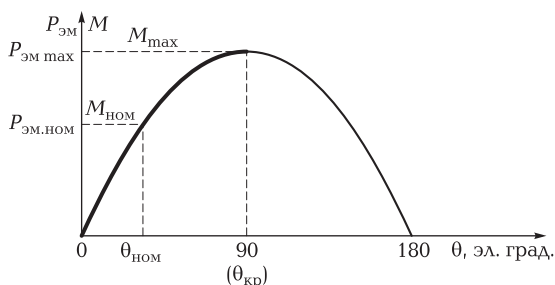
(болжалды теңдік белгісі теңдік белгісіне ауыстырылған).

Машина дамытатын электрмагнитті иінкүш, $M = \frac{P_{эм}}{\Omega_c}$, мұндағы Ω_c — ротордың синхронды айналу жиілігі (асинхронды қозғалтқыштың электрмагнитті иінкүшінің (9.28) өрнегімен салыстыру керек). (12.3) өрнегіне сәйкес төмендегіні аламыз

$$M = m U_r \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta. \quad (12.4)$$

Синхронды генератордың бұрыштық сипаттамасы. (12.3) және (12.4) өрнектерінен E_0 генераторының берілген ЭҚК-сы және оның U шықпаларындағы кернеу кезінде генератордың қуаты мен оның электрмагнитті иінкүші $\underline{E}_0$ ЭҚК векторы мен $\underline{U}_r$ кернеу векторы арасындағы θ бұрышына байланысты болатындығын көруге болады. желінің кернеуі тұрақты және генератордың қоздыру тогы тұрақты болған жағдайда, генератор желімен параллель жұмыс істеген кезде E_0 және U_r шамалары мәндерінің тұрақтылығы орын алады. Аталған жағдайлар кезінде (12.3) өрнегі *генератордың бұрыштық сипаттамасының* өрнегі, яғни $P_{эм}$ электрмагнитті қуаттың $E_0 = \text{const}$ және $U_r = \text{const}$ кезінде θ бұрышына тәуелділік өрнегі болып табылады. Бұрыштық сипаттама (12.4-сурет) амплитудасы бар синусоид болып табылады

$$P_{эм \max} = m U_r \frac{E_0}{x_c} = m U_r I_k, \quad (12.5)$$



12.4.-сурет. Айқын емес полюсті генератордың бұрыштық сипаттамасы.

мұндағы $I_k = E_0/x_c$ — аталған қоздыру тогы кезіндегі үш фазалы қысқа тұйықталу тогы (11.25) өрнегін қараңыз), полюсі анық емес генераторда синхронды индуктивті кедергілер бойлық және көлденең осьтер бойынша тең болады: $x_c = x_q = x_d$, бұл 11.4-бөлімінде берілген.

Генератордың тұрақты жұмысына неғұрлым қалың сызықпен көрсетілген бұрыштық сипаттаманың сол жақ тармағы сәйкес келеді. $\theta > 90$ эл. град. бұрыш кезінде генератор синхронизмнен шығады (одан әрі 12.4-бөлімді қараңыз).

Айқын полюсті генератордың электрмагнитті қуаты. Электрмагнитті қуат (12.3) пен электрмагнитті иінкүш (12.4) өрнектерінің *полюсі анық емес* генератордың векторлық диаграммасы негізінде алынғандығын атап өткен жөн (11.12-суретті қараңыз). Бұл өрнектерге x_c синхронды индуктивті кедергі кіреді. Векторлық диаграммалары 11.11-суретте көрсетілген *полюсі анық* генераторда синхронды индуктивті кедергілер бойлық (x_d) және көлденең (x_q) осьтер бойынша ерекшеленеді; d және b нүктелері сәйкес келмейді және электрмагнитті қуат үшін (12.3) өрнегі дұрыс келмейді. Полюсі анық емес генератордың векторлық диаграммасын талдаудан алынуы мүмкін электрмагнитті қуаттың теңдігін шығармай келтірейік:

$$P_{эм.яв} = mU_r \frac{E_0}{x_c} \sin \theta + \frac{mU_r^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.6)$$

Көрініп тұрғандай, келтірілген теңдік полюсі анық емес генератор үшін алынған екінші қосылғышы бар теңдіктен өзгеше. (12.6) теңдігінің екі бөлігін синхронды Ω_c бұрыштық жылдамдыққа бөле отырып, электрмагнитті иінкүштің теңдігін аламыз:

$$M_{яв} = mU_r \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta + \frac{mU_r^2}{2\Omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.7)$$

Бірінші қосылғыш $M_{\text{осн}}$ негізгі электрмагнитті иінкүш, екінші қосылғыш M_p реактивті иінкүш деп аталады:

$$M_{\text{осн}} = mU_r \frac{E_0}{\Omega_c x_c} \sin \theta; \quad M_p = \frac{mU_r^2}{2\Omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.8)$$

Реактивті иінкүштің өрнегінен $x_g = x_d$ теңдігі орындалатын болса (полюсі анық емес генератор жағдайы), $M_p = 0$ болатындығын көруге болады.

$M_{\text{осн}}$ негізгі иінкүштің U_r генераторының шықпаларындағы кернеуімен, сонымен қатар қоздыру орамасының тогына негізделген ротордың магнитті тасқынына байланысты болатын E_0 генераторының ЭҚК күшімен анықталатындығын атап өткен маңызды. M_p реактивті иінкүші E_0 ЭҚК күшіне байланысты емес және сондықтан қоздыру орамасының тогына байланысты емес. Егер генератор желімен қатар жұмысқа қосылған болса, реактивті иінкүш генератордың шықпаларындағы кернеуге тең болатын желінің кернеуіне байланысты.

Синхронды генератордың электрмагнитті қуаты мен электрмагнитті иінкүші туралы барлық айтылған дүниенің синхронды қозғалтқышқа да қатысы бар (одан әрі 13-тарауды қараңыз), бір ерекшелігі қозғалтқышта электрмагнитті иінкүш тежегіш емес айналмалы болып табылады. Полюсі анық емес машинада реактивті иінкүштің болуы қозғалтқышты қоздыру орамасыз алуға мүмкіндік береді (одан әрі 13.3-бөлімді қараңыз).

12.4.

СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОР ЖҰМЫСЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ

Статикалық тұрақтылық. Бастапқы қозғалтқыш пен генератордан тұратын агрегаттың *статикалық тұрақтылығы* деп тепе-теңдік күйінде шамалы ауытқу кезінде оның бастапқы жұмыс режимін өздігінен қалпына келтіру қабілетін атайды. *Қуатты желімен параллель жұмыс істейтін полюсі анық емес генераторға қатысты статикалық тұрақтылық* мәселесін қарастырайық. $P_{\text{эм}}$ генераторының электрмагнитті қуаты ((12.3) теңдігін қараңыз) бұл жағдайда ротор мен статордың магнитті өрістерінің осьтері арасындағы (немесе E_0 генераторының ЭҚК векторы мен оның U_r қысқыштарындағы кернеу векторының бағыты арасындағы) θ бұрышында ғана анықталады. (12.3) теңдігіне кіретін өзге шамалар 12.3-бөлімде айтылып кеткендей параллель жұмыс кезінде өзгеріссіз қалады.

M тежегіш электрмагнитті иінкүші M_1 айналдыру иінкүшіне тең болған кезде ротор θ бұрышын өзгеріссіз сақтай отырып, тұрақты жиілікпен айналады.

Егер қандай да бір себептермен M_1 айналдыру иінкүші біршама артып, содан кейін алдыңғы мәнге дейін азаятын болса, ротор айналу бағыты бойынша алға қарай ығысатын, яғни θ бұрышы біршама $\Delta\theta$ өсім алады. Қуатты желімен жұмыс істейтін полюсі анық емес генератордың бұрыштық сипаттамасынан (12.4-суретті қараңыз) θ артқан кезде $\theta = 90$ эл. град. мәнге дейін $P_{эм}$ электрмагнитті қуатының, сонымен қатар M тежегіш электрмагнитті иінкүшінің артуын көруге болады. Осылайша, бастапқы қозғалтқыш – генератор агрегатын бастапқы қалыпқа қайтаруға ықпал тигізетін $\Delta M = \Delta P_{эм} / \Omega_c$ асқын тежегіш иінкүші пайда болады. Бұл үдеріс толығырақ әрі қарай қаралады.

Егер айналдыру иінкүші біршама азайып, сонан соң алдыңғы мәнге дейін азаятын болса, ротор теріс жылдамдық алады және θ бұрышы азаяды. Бірақ бұл ретте M тежегіш иінкүші де азаяды: ол айналдыру иінкүшінен кем болып, қорытқы оң иінкүш жүйесін қалпына келтіреді.

Осылайша, θ бұрышы 0-ден 90 эл. градусқа дейін өзгерген шектерде желімен қатар жұмысқа қосылған генератордың жұмысы тұрақты болады.

Егер θ бұрышы 90 эл. градустан асатын болса, айналдыру иінкүшінің артуы тежегіш иінкүшінің азаюына әкеп соғады, θ бұрышы артып, генератор синхронизмнен шығып кетеді.

Сонымен, полюсі анық емес генератор үшін артқан кезде бастапқы қозғалтқыш - генератор агрегатының тұрақты жұмысы мүмкін болмайтын $\theta_{кр}$ сыни бұрыш 90 эл. град. құрайды.

Электрмагнитті қуаттың полюсі анық емес генератордың θ бұрышына тәуелділігі (12.6) теңдігімен анықталады. Бұл тәуелділік электрмагнитті иінкүштің θ бұрышына тәуелділігі (12.7) теңдігі) секілді синусоидалық болып табылмайды. Ол екі синусоидтың жиынтығы болып келеді; сонымен бірге екінші синусоидтың бірінші синусоидқа қарағанда кезеңі 2 есе кем (екінші қосылғышта синус аргументі екінші қосылғышқа қарағанда 2 есе көп). Бірінші синусоид 0-ден 90 эл. градусқа дейінгі θ интервалында өседі, ал әрқашан амплитудасы кем болатын екінші синусоид θ бұрышы 0-ден 45 эл. градусқа дейін өзгерген кезде өседі, одан әрі $90 = 90$ эл. град. кезінде нөлге айнала отырып кемиді. 90-нан 180 эл. градусқа дейінгі интер-

валда бірінші синусоид ең көп мәннен нөлге дейін кемиді, ал екіншісі осы интервал кезінде теріс мәндерден өтеді. Полюсі анық емес генератордың $P_{эм}(\theta)$ немесе $M(\theta)$ синусоидалық емес жиынтық тәуелділігі 0-ден $\theta_{кр} = 60...80$ эл. градусқа дейінгі интервалда өседі (статикалық тұрақтылық аясы) және $\theta_{кр}$ мәнінен 180 эл. градусқа дейінгі интервалда нөлге дейін кемиді.

Полюсі анық емес генераторда, сонымен қатар полюсі анық генераторда $\theta_{кр}$ бұрышына M_{max} максималды электрмагнитті иінкүші сәйкес келеді. Максималды иінкүштің атаулы иінкүшке қатынасы $M_{max}/M_{ном}$ *машинаның асқын жүктемелік қабілеті* деп аталады. Бұл параметр әртүрлі генераторлар үшін 1,4-тен 3-ке дейін мән қабылдайды.

Синхронды генераторлардың теңселуі. Сонымен, егер сыни мәннен кем болатын θ бұрышының мәні кезінде жұмыс істейтін генератордың роторында асқын айналдыру иінкүші қысқа уақытта әрекет ететін болса, генераторды тепе-теңдік күйіне қайтаратын қосымша тежегіш электрмагнитті иінкүші пайда болады, ол кезде M_1 айналдыру иінкүші M тежегіш иінкүшіне тең болады. Алайда осы қалыпқа жеткен соң θ бұрышы генератор мен бастапқы қозғалтқыштың айналатын бөліктерінің инерциялы қасиеттерінің салдарынан азаюды жалғастырады (айналатын дененің инерциялы қасиеттерінің оның инерция иінкүшімен анықталатындығын еске сала кетейік, 3.3-бөлімді қараңыз). θ бұрышы тепе-теңдік күйіне сәйкес келетін бұрыштан кем болған кезде тежегіш иінкүш айналдыру иінкүшінен кем болады. θ бұрышы біршама аз мәнге жетіп, осыдан кейін қайта өсе бастайды. Ротор қайта тепе-теңдік күйінен өтеді және θ бұрышы өсуді жалғастырады және неғұрлым үлкен мәнге жетеді. Одан әрі үдеріс қайталанады. Осылайша, ротор бірқалыпты бір бағытта айналғанмен оның айналу жылдамдығы ауытқиды: оның мәні Ω_c синхронды жылдамдықтан бірде төмен болса, бірде жоғары болады. Уақыт өте бұл теңселулер басылады: θ бұрышының максималды және минималды мәндері арасындағы айырма бара-бара азая бастайды. Теңселулер басылған соң ротор айналдыру иінкүшінің немесе генератордағы электр жүктеменің өзгеруі жаңа теңселу үдерісін тудырғанға дейін Ω_c бұрыштық жылдамдығымен тұрақты айнала бастайды.

Теңселулердің басылуы ең алдымен магнитті болып шыққан энергияның шығындарымен туындайды. Теңселулер кезінде ротор статордың магнитті өрісіне қатысты алғанда қозғалған кезде ротордың өзегінде құйынды токтар индукцияланады. Құйынды токтардың

магнитті өрісі мен статор өрісінің өзара әрекеті мен салыстырмалы қозғалу бағытына қарама-қарсы бағытта әрекет ететін *тыныштан-дырғыш иінкүшті* туғызады.

Синхронды машина роторының теңселуінің пайда болуы және басылуы серіппеге асылған жүкті тепе-теңдік қалпынан шығарған соң орын алатын тербелу үдерісімен салыстыруға болады (серіппелі маятник). Теңселулер басылған соң жүк жерге қатысты алғанда тыныштық күйіне түседі, ал синхронды машинаның роторы статордың айналып тұратын өрісіне қатысты алғанда тыныштық күйіне түседі.

Ротордың теңселуі маятниктің теңселуі секілді еркін немесе мәжбүрлі болуы мүмкін. Бұрын еркін (өздігінен) теңселулер қарастырылған болатын. Ротордың мәжбүрлі теңселулері жетекті қозғалтқыш мерзімді бірқалыпты айналмаған кезде орын алады, бұл үдеріс сонымен бірге поршеньді дизель қозғалтқышында орын алады. Мәжбүрлі теңселу жиілігі өздігінен теңселу жиілігіне сәйкес келген кезде механикалық резонанс туындайды, ол кезде теңселу амплитудасы күрт артады және генераторлардың параллель жұмысы мүмкін емес болады.

Полюсі анық емес генераторларда теңселуді басатын арнайы шаралар қолданылмайды; оларда теңселулер ротордың өзегінде пайда болатын құйынды токтардың арқасында ғана басылады.

Полюсі анық генераторларда *тыныштандырғыш (демпферлік) орама* қолданылады. Өзінің конструкцисы бойынша демпферлік орама асинхронды қозғалтқыштың қысқа тұйықталған орамасына — «Беличья клетка» құрылғысына ұқсас (9.2-суретті қараңыз). Мұндай ораманың өзектері синхронды машинаның полюстік ұштықтарында қарастырылған саңылауларға салынады. Саңылау түріндегі бүйірлік жалғайлар полюстік ұштықтар шектерінен тыс орындалады.

Динамикалық тұрақтылық. Синхронды генератордың статикалық тұрақтылығы туралы айта отырып, біз оның айналдыру иінкүшінің немесе электр жүктемесінің шағын өзгерістеріне деген реакциясын қарастырған болатынбыз. Синхронды машинаның *динамикалық тұрақтылығы* деп жұмыс режимі күрт өзгерген кезде оның синхронизмнен шығып кетпеу қабілеті аталады.

Жүктеме күрт өзгерген кезде (мысалы, желіде қысқа тұйықталу орын алған кезде) ротор қарқынды түрде теңселе бастайды — үдеу мен тежеудің алмасуы орын алады. Егер ротор қозғалысын үдеткен кездегі энергия генератормен роторды тежеген кезде желіге қайтара-

тын энергиядан асып кететін болса, машина синхронизмнен шығып кетеді, яғни динамикалық тұрақсыз болады.

Динамикалық тұрақтылықты арттыру үшін *қоздыруды жылдамдату* қолданылады (11.7-бөлімді қараңыз), ол кезде қоздыру тогы, сонымен қатар зәкір орамасының ЭҚК-сы үлкен жылдамдықпен арта бастайды.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Синхронды генераторды желімен қатар жұмысқа қосу жағдайларын атаңыз. Оларды тұрақты ток генераторларын қатар жұмысқа қосу жағдайларымен салыстырыңыз.
2. Автоматты құрылғыларды пайдаланбай орындау кезінде генераторды желімен нақты синхрондау рәсімдемесін сипаттап беріңіз.
3. Генераторды желімен өздігінен синхрондауды жүзеге асыру үшін қандай жағдайлар сақталу тиіс?
4. Синхронды генератор желіге беретін белсенді және реактивті қуат қалайша реттеледі? Синхронды генераторды қалыпты қоздыру деп нені атайды? Синхронды генератордың «қайта қозуы» және «жете қозбауы» терминдері нені білдіреді?
5. Синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамасы деп нені атаймыз? Генератордың нөлдік және нөлдік емес белсенді қуаттары кезіндегі U-тәрізді сипаттаманың түрін түсіндіріңіз?
6. Дербес жұмыс істейтін синхронды генераторға тиетін қоздыру және айналдыру иінкүш тогының өзгеруі мен осы факторлардың қуатты желімен параллель жұмыс істейтін генераторға тигізетін әсердің ерекшеліктері неде?
7. Генератор мен қуатты желінің параллель жұмысымен салыстырғанда қуаты өлшемдес екі синхронды генератордың параллель жұмысының ерекшеліктері қандай?
8. Генератордың берілген ЭҚК-сы мен оның шықпаларындағы кернеу кезінде синхронды генератордың электромагнитті қуаты мен электромагнитті иінкүші неге байланысты болады? Синхронды генератордың бұрыштық сипаттамасы деп нені атаймыз?
9. «Статикалық тұрақтылық» термині нені білдіреді? Синхронды генератордың статикалық тұрақтылық жағдайы неге негізделген?
10. Жүктеме немесе айналдыру иінкүші өзгерген кезде пайда болатын синхронды генератордың теңселу үдерісін сипаттап беріңіз. Генератордың теңселуін тыныштандыру үшін қандай шаралар қолданылады?
11. Синхронды машинаның динамикалық тұрақтылығы деп нені атаймыз? Динамикалық тұрақтылықты арттыру үшін қандай шаралар қолданылады?

СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР ЖӘНЕ КОМПЕНСАТОРЛАР

13.1. СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ

Үш фазалы синхронды қозғалтқыштың жұмыс істеу қағидалары. Синхронды қозғалтқыш пен синхронды генератордың құрылымы ұқсас болады. Бір синхронды машина қозғалтқыштың да, генератордың да қызметін атқара алады (3.1 және 12.2 электр машиналарын айырбастау жолдары). Синхронды қозғалтқыштың және генератордың қоздыру орамасы тұрақты ток көзін қажет етеді. Қоздыру орамасын электр машинаның қозғалмалы бөлігіне (роторға) орналастырады. Статорда орналасқан қозғалтқыш зәкірінің орамасы үш фазалық айнымалы ток желісіне қосылып айналмалы магниттік өріс жасайды (8.1, б).

Қоздыру орамасында бір жұп полюс ($p=1$) немесе одан да көп полюс болады. Зәкірдің (статордың) орамасы осындай полюс көлеміне сай келетіндей магниттік өріс жасауы тиіс. Статордың өріс айналымы:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (13.1)$$

минуттық айналыммен өлшенетін жиілікпен айналады, кернеуді қуат беретін f герцпен өлшенеді (8.2 және 8.4 формулалар).

(13.1) формула бойынша кернеуді қуат беретін бір кезеңде $p=1$ жағдайында статор өрісі толық айналымға түседі (3600 бұрылады) $p=2$ жағдайында статор 180° бұрылады, бұл 360 эл. град. сәйкес келеді, 8.1 бөлімде көрсетілгендей, бұл жағдайда, бір кезеңде өрістің кернеуді қуат беретін статордың магниттік жүйесінің аттас полюстері жақын орналасқан тиісті бұрышқа қарай бұрылады.

Статордың айналмалы магниттік өрісі мен ротордың қоздыру орамасының магниттік өрісінің өзара әрекеттесу нәтижесінде ротор n статор магниттік өрісіндегідей жиілікпен айналады, яғни, *статор өрісімен синхронды* айналымда болады. Ротордың әрбір полюсі мен статордың магниттік полюстері бір-біріне тартылып, ротор айналады (Егер оның айналасына басқа магнитті орналастырса,

дәл осындай жолмен жолақ формалы және өське еркін орналасқан тұрақты магнит айналады). Полюстердің тартылысына байланысты айналмалы электромагниттік иінкүш пайда болады (электромагниттік иінкүштің генератордан айырмашылығы тежегіштігінде, 12.3 – бөлімін қараңыз).

Синхронды қозғалтқыш білігінің жүктемесін өзгерткенмен оның роторының айналу жиілігі өзгермейді. Тек қана статор мен ротордың магниттік өрісінің арасындағы біліктіктің (ось) θ - бұрышы өзгереді.

Синхронды қозғалтқышты іске қосу. Синхронды қозғалтқышты желіге қарапайым қосумен іске қосуға болмайды, себебі статордың айналмалы магниттік өрісі қозғалыссыз тұрған ротормен орын ауыстырып, машинаның айналу мүмкіндігі нөлге тең болады. Қозғалтқышты іске қосу үшін оған айналу жиілігінің деңгейін хабарлау қажет. Бұл төменде сипатталған тәсілдер арқылы жүзеге асырылады.

1 – тәсіл. Үдемелі қозғалтқыштың көмегімен іске қосу. Бұл тәсіл бойынша синхронды машинаның роторы көмекші қозғалтқыштың көмегімен синхронды жиілілікпен айналады (синхронды айналысқа жуық жиілілікте). Бұдан кейінгі қозғалтқышты іске қосу тәртібі синхронды генераторды желіге параллель қосқан кезде өзіндік сәйкестендіру, өзіндік синхрондау әдісімен жүргізіледі (12.1). Осыдан кейін үдемелі қозғалтқыш сөндіріліп, синхронды машина қозғалтқыш тәртібімен жұмыс істей бастайды. Үдемелі қозғалтқыштың қуаты синхронды қозғалтқыштың номиналды қуатынан 10...20% аспайды. Бұл тәсіл қозғалтқыш білігіне жүктемеі түспеген жағдайда қолданылады. Қазіргі кезде үдемелі қозғалтқышпен қосу тәсілі көп қолданылмайды. Кейде осындай тәсілмен қуатты компенсатордың жұмысын жеделдетеді (13.2. б).

2 – тәсіл. Синхронды қозғалтқышты асинхронды түрде іске қосу. Қозғалтқышты белгіленген жүктемемен іске қосу үшін, ойыққа салынған өзекшелерден тұратын орамамен орайды, ол ротордың шет жағына сақина тәрізденіп біріктіріледі (синхронды генератордың орамасы да өз тәсілмен жүзеге асырылады, 12.4. б.).

Іске қосу орамасындағы қозғалмайтын роторға тән статордың магниттік өрісі айналған кезде қоздыру орамасында және ротордың магнит өрісімен қиылысатын металл бөліктерінде ток жүреді. Айналмалы магниттік өріс пен индукцияланған токтың магниттік өрісі әрекеттесіп, ротор айналады да біртіндеп жылдамдығы арта-

ды. Басқа сөзбен айтқанда, синхронды қозғалтқышты асинхронды әдіспен іске қосқанда асинхронды тәсілмен жұмыс істейді (9.1. б). Ротордың айналу жиілігі синхрондық жиілік деңгейіне жеткенде қоздыру орамасы тұрақты ток көзіне қосылады да, ротор синхронды түрде айналады, яғни, оның айналу жиілігі статордың магниттік өрісінің жиілігіне тең келеді.

Айқын полюсті машиналардың синхронды болуына оған тән реактивтік M_p иінкүш әсер етеді (12.3.б). Айқын полюсті машиналар бос жүріс режимде немесе шағын жүктеме кезде қоздыру орамасын тұрақты ток көзіне қоспай-ақ тепе-теңдікті сақтайды.

Қуаты 50 кВт-қа дейінгі синхронды қозғалтқышты асинхрондық түрде іске қосуды, бастапқы орама болмаған жағдайда ротордың қалың бөлігі мен қоздыру орамасындағы индукциялық ток арқылы жүзеге асыруға болады, бұл жағдайда өзіндік тұйықталу деңгейі R_{II} болады.

Қуаты 2 000 кВт-дан астам қозғалтқыштардың роторлары ротордың екі жағы жез сақиналармен біріктірілген тұтас (дестеленген) полюстік ұштықтары бар көлемді ротордан жасалады. Полюсті ұштықтардағы индукциялық ток қозғалтқышты жедел іске қосуға жететін асинхрондық иінкүш тудырады. Бұндай қуатты қозғалтқышқа қарапайым ораманы (өзекше, бүйірлі сақина) пайдаланғанда орама қатты қызып кетеді де, оның механикалық төзімділігі төмендейді (дәнекердің, өзекшенің бұзылуы).

Асинхронды іске қосуда синхронды қозғалтқыштың қоздыру орамасы ток көзінен ажыратылуы тиіс. Бірақ оны ашық күйінде қалдыруға болмайды, оның бойында орамаға сыймайтын ЭҚК болуы мүмкін, ол оқшаулауға бөгет болады. Қоздыру орамасын қатты орап тастауға да болмайды, себебі орама қызып кетуі мүмкін және бірсызды қосылуға әкеліп соқтырады. Бұл дегеніңіз қозғалтқышты қосқан кезде ротордың айналым жиілігі синхронды айналымның жартысындай ғана болып, синхронизмге (тепе-теңдікке) енбеуі мүмкін. Осы жағдайды болдырмау мақсатымен, іске қосар сәтте қоздыру орамасы $R_{II} = 7 \dots 12$ Лв қоздыру орамасының қарсылығы R_b болуы тиіс.

Е с к е р т у. Бір жақты қосу кезінде ротор симметриялық болмаған жағдайда электромагнит айналып тұрған сәтте айналу жылдамдығының жиілігі синхронды жиіліктің ортасына келгенде жиілік төмендеуі мүмкін. Бұндай жағдайлар қысқа тұйықталған қоздыру орамасы болған кезде кездеседі. Бұл

жиілікті төмендегідей түсіндіруге болады: айналма кезінің алгебралық сома ретінде, тура және кері иінкүштері бір фазалық асинхронды қозғалтқыш жұмысына жасаған талдау жолымен орындалады (10.2 бөлімін қараңыз).

Синхронды қозғалыстың жұмыс сипаттамасы. Қозғалтқыштың жұмыс сипаттамасы дегеніміз – қоздыру тогы, желі кернеуінің жиілігінің тұрақтылығы қалыпты болған жағдайда ротордың айналу жиілігі n эәкірдің (статордың) тогы I_1 , кіріс қуаты P_1 , білікке пайдалы иінкүш M_2 , электромагниттік иінкүштің айналуы M , қозғалтқышпен эзірленген қуат коэффициенті $\cos\varphi$ және тиімділік коэффициенті, қозғалтқыштың тиімді қуаты P_2 .

Синхронды қозғалтқыштың жұмыс сипатының ерекшеліктеріне тоқталамыз.

Ток желісінің жиілігі өзгермеген жағдайда барлық жұмыс кестесінде синхронды қозғалтқыштың n айналу жиілігі тұрақты болады. Сондықтан $n(P_2)$ абцисс осьтің тура және параллель қалпын білдіреді.

Қозғалтқыштың айналдыру кезі M бекітілген тәртіп бойынша біліктегі статикалық иінкүш $M_{\text{ст}}$: $M = M_{\text{ст}} = M_2 + M_0$. M_2 – пайдалы иінкүші. M_0 – бос жүріс иінкүші (3.15 формуланы қараңыз).

M_0 иінкүші тұрақты болып қалады, пайдалы иінкүш M_2 біліктегі пайдалы қуатқа пропорционалды өзгереді:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{60P_2}{2\pi n}, \quad (13.2)$$

M_2 Н·м өлшенеді. Ω – ротор айналымының бұрыштық жылдамдығы.

Пайдалы иінкүш пен пайдалы қуат пропорционалды болғандықтан, $M_2(P_2)$ сипаттамасы абцисстің білігіне қарай координатордан басталып тік бұрышпен белгіленеді. $M(P_2)$ тік бұрышпен сипатталып, $M_2(P_2)$ параллель M_0 мәнінен жоғары орналасқан түрде болады.

$\cos\varphi$ қуатының қозғалтқыш білігінің жүктемесінің коэффициентіне тәуелділігі қоздыру тогы арқылы анықталады. $\cos\varphi = 1$ бос тұрған жағдайды білдірсе, $\cos\varphi < 1$ жүктеме бар екендігін білдіреді. Қоздыру тогын реттей отырып, кез келген жүктемені $\cos\varphi = 1$ белгілеуге болады.

Жүктеме көбейген сайын электр шығыны көбейгендіктен, қозғалтқыштың білігіндегі қолданыс қуаты P_1 пайдалы қуаты P_2 қарағанда

көбірек болады.

Сондықтан $P_1(P_2)$ сипаттамасы тура болмай, жанама бұрышқа қарай қисайып барып біртіндеп ұлғаяды.

Статордың тогы I_1 , төмендегідей:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U \cos \varphi}. \quad (13.3)$$

$I_1(P_2)$ тәуелділігі жүктеме өзгерген сәтте, $\cos \varphi$ өзгергеуімен анықталады.

Жүктемеден η қозғалтқыштың ПӘК тәуелділігінің сипаттамасы барлық электр машиналары үшін бірдей. Жүктеменің $0,25P_{2\text{ном}}$ -ға дейін бос жүріс режимінен ПӘК жылдам ұлғаяды. ПӘК мәні $0,25P_{2\text{ном}}$ шамасында болғанда, номиналдыға жақын мәнге жетеді. Әрі қарай ПӘК жүктемесі бірсарынды азаяды.

Синхронды машина қозғалтқышының жұмыс тәртібін генератордың жұмыс тәртібімен салыстыру. Айқын емес полюсті және айқын полюсті синхронды генераторлардың электромагниттік қуаты мен электромагниттік иінкүшті теңестіру (12.3)...(12.8) синхрондық қозғалтқыштарға да жасалады, бұл жағдайда қозғалтқыш электромагниттік қуатты желіден алатыны, ал генератордың, керісінше қуатты беретіндігі ескеріледі. Электромагниттік иінкүш қозғалтқышты айналдырады, ал генераторды тежейді. Қозғалтқыштың білігіндегі механикалық жүктеме көбейген кезде (пайдалы механикалық қуат P_2 және пайдалы иінкүш M_2 көбейгенде) ротор өз калпымен бұрылады, бос тұрған кезде алдыңғы синхронды жиілікпен n кері айналады (синхронды бұрыштық жиілікпен Ω).

Синхронды қозғалтқыштың өзіне тән ерекшелігін, оның желі кернеуі фаза бойымен ілгерілей отырып, токпен жұмыс істеу қабілетін негіздеу үшін желіге параллель жұмыс істеуге қосылған генераторды қайта қарау тиімді. Генератордың роторы алғашқы қозғалтқыштың әсерімен айналады; генератордың қоздыру тогын жасайды, бұл ретте оның ЭҚК E_0 желі кернеуі U_c тең болып, генераторды желіге параллель қосу сияқты әрекеттердің орындалуын қамтамасыз етеді (12.1 – бөлімді қараңыз). Генераторды желіге параллель етіп дұрыс қосқан жағдайда әзірдің орамасындағы генераторға қосылған ток нөлге тең екендігі 12.2 - бөлімде көрсетілген; *ол желіге қуат бермейді де, алмайды да*. Басқа сөзбен айтқанда, синхронды машина шекаралық тәртіппен жұмыс істейді, яғни, генератор да қозғалтқыш та болмайды. Егер осы тәртіппен машинаның қоздыру тогын көбейтсе,

реактивті I_p ток пайда болады, оның зәкіріндегі индуцирленген ЭҚК, E^0 – дан 90° бұрышқа кейін қалып, U_c желі кернеуінен сол бұрышқа қарай озыңқы болады. Машинаның жұмыс істеу тәртібі шекаралық болғандықтан, соңғы бекіту генераторға да, қозғалтқышқа да қатысты болады (қоздыру тогын көбейткенде машина желіге белсенді қуат көзін бере алмайды, сондықтан оны генератор тәртібінде жұмыс істейді деп айта алмаймыз). Егер қоздыру тогын азайтса, реактивті ток желі кернеуінен қалып қояды (12.2 в сурет).

Машина генератор режимімен алғашқы қозғалтқыштың айналу иінкүшін көбейткен кезде жұмыс істей бастайды (12.2). Егер машинаның айналу иінкүшін азайтса, машина желідегі белсенді токпен қуат беріп, желіге ток бермей қозғалтқышқа айналады. Пайдаланылатын белсенді ток фазасы бойынша 180° бұрышқа берілетін токтан өзгеше болады. Бұл дегеніміз – машина тұрақты токты генератордан қозғалтқыш режиміне ауыстырғанда токтың бағытының кері өзгеруі (2.6 бөлім).

12.2, а-суретке қараймыз, суретте генератордың өзімен параллель жұмыс істейтін желіге белсенді қуат күшін беретін векторлық диаграммасы берілген. Машина қозғалтқыш ретінде жұмыс істеп, оның белсенді тогы I_a болса, жоғарыда көрсетілгендей машинаның кернеу фазасына қарсы U_p , ал желі кернеуінің фазасымен сәйкестікте U_c болады. Машина қайта қызғанда, ток әдеттегіден артық болып, I_v қоздыру тогы $I_{v, \text{норм}}$ болады (зәкірдің тогы белсенді болғанда қалыпты қоздыру тогы деп есептеледі). Зәкірдің тогы қайта қоздыру белсенді токтан басқа реактивті I_p токтың пайда болуына әсер етеді. 12.2 б суретте бұрын көрсетілгендей бұл реактивті ток кернеу желісінің фазасынан алға өтіп, синхронды машинаның фазасына өтеді. Егер қоздыру тогын азайтса, желіге қатысты реактивті токтың құрамдас бөлігі пайда болады.

Сонымен, синхронды машинаның генераторлық режимнен қозғалтқыштық режимге өткен кезде оның белсенді ток фазасы қарама – қарсылықта болады, ал реактивтік фаза өзгермейді. Сондықтан қатты қыздырылған қозғалтқыштың зәкірінің тогы қатты қыздырылған генератордікі сияқты желі кернеуінің фазасынан жоғары болады, қатты қыздырылмаған машинаның тогы екі режим жағдайында да желі кернеуінен қалып қояды.

Машина қозғалтқыш режиміне ауыстырылғанда, оның роторы бастапқы қозғалтқышты ажыратқан кезде де айналуын тоқтатпайды.

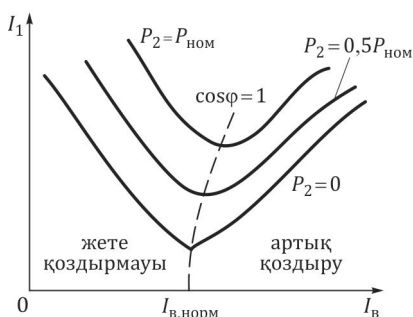
U – синхронды қозғалтқыштың бейнелі сипаттамасы. U –

бейнелі сипаттамалар – бұл зәкірдің (статордың) I_1 тұрақты білік жүктемесінен, желі кернеуінің тұрақты және жиілікті кернеу кезінде I_B қоздыру тогына тәуелділігі (13.1 - сурет).

Егер синхронды қозғалтқыш бос жүрісте немесе берілген жүктеме бойынша жұмыс істеген жағдайда қалыпты қоздыру тоқты $I_{B, \text{норм}}$ -ға жеткізгенде, зәкірдің тогы ең төменгі мәнге ие болғанда қозғалтқыштың қуаты таза белсенді болады, яғни, $\cos\varphi = 1$. Қоздыру тогы қалыпты токтан аз немесе көп болған жағдайда зәкірдің тогы ең төменгіден жоғары болады.

Жоғарыда көрсетілгендей қозғалтқыштың қоздыру тогы қалыптыдан жоғары болса, зәкірдің тогы желі кернеуіне қарағанда озыңқы (сыйымдылықты) болады, ал толық қызбаған жағдайда артта қалған (индуктивті) болады. Синхронды қозғалтқыштың осы ерекшелігі электр қондырғыларының коэффициенттік қуатын арттыру үшін пайдаланылады. Асинхронды қозғалтқыштар тобына қатты қыздыратын бір немесе бірнеше синхронды қозғалтқыштарды қосса, ол арқылы желіде пайда болаған ток асинхронды қозғалтқыштың жұмысына байланысты индуктивті тоқты жартылай немесе толықтай өтей алады. Сол кезде барлық электр жүйесі $\cos\varphi$ бірлікке жақын қуат коэффициентімен жұмыс істей бастайды, бұл өз кезегінде ықпал етеді (әрі қарай 13.2 бөлімін қараңыз).

Синхронды қозғалтқыштың U-тәрізді сипаттамалары дәл желімен параллель жұмыс істейтін синхронды қозғалтқышпен бірдей болады (12.3 - суретті қараңыз). Бірақ, қозғалтқыштың U-тәрізді қисық сызығы абсцисс осьпен жанаса алмайды, себебі қозғалтқыштың білігіндегі ең аз қуат мөлшері нөлге тең болмайтын P_0 бос жүріс қуаты (алғашқы қозғалтқыш жоқ деген мағынада).



13.1-сурет. Синхронды қозғалтқыштың U-тәрізді сипаттамалары.

Синхронды компенсатор – электр желісінің қуат коэффициентін көтеруге арналған синхронды қозғалтқыш.

Электротехника курсынан белгілі болғандай, электр құрылғылар мен кәсіпорындардың $\cos\varphi$ қуат коэффициентін бірлікке жақын мәндеріне жоғарылату, генераторлардың номиналды қуатын толық пайдалану және жылуды аз шығындау үшін қажет (егер энергия қабылдағыш өзгермейтін қысым мен белсенді қуатпен жұмыс істесе, онда қабылдағыштың қуат коэффициенті азайған сайын, желіні қуат беретін тогы ұлғая бастайды. Ток көп болған сайын, генераторды қуат беретін сымдар мен зәкір орамасында шығындары көбейеді). Көп жағдайда өндірістік және тұрмыстық энергия қабылдағыштар фаза бойында қуат кернеуі артта қалып отырған токты пайдаланады (белсенді – индуктивтік). Индуктивті токтың орнын толтыру үшін кей жағдайда конденсаторды параллель қосады. Бірақ шағын қуатпен қосқанның өзінде конденсаторлар үлкен, қолайсыз және қымбат болғандықтан, қуат коэффициентін көтеру үшін озыңқы токты пайдаланатын қатты қыздырылған синхронды қозғалтқышты электр жүйесіне қосу экономикалық тұрғыдан тиімді болады (3.1 - бөлім).

Синхронды компенсаторларды 1-ден 160 МВ·А қуатта өндіреді. Стандарт бойынша компенсаторлардың номиналды кернеуі 6,6; 11 және 22 кВ. Зерттеулер көрсеткендей, синхронды компенсаторлар үшін, алты немесе сегіз полюстік айқын полюсті роторлар тиімді.

Синхронды компенсаторды асинхронды түрде іске қосу қолданылады (13.1-бөлімін қараңыз), сондықтан роторға іске қосатын «беличья клетка» құрылғысын орналастырады. Механикалық жүктемесі бар қозғалтқыштан синхронды компенсатор білігінің айырмашылығы - ол мұндай қызмет атқармайды, оның диаметрі кішілеу болып келеді, ал мойынтіректері жеңілдетілген конструкцияға орнатылады. Айналдыру иінкүшін беруге арналмаған білік корпустан тысқары шықпайтындықтан, синхронды компенсаторды сутекпен салқындату үшін аздап жеңіл герметикалауға болады (11.8-бөлімін қараңыз).

Синхронды компенсатор (СК) нөлдік белсенді қуатпен ($P_{СК} = 0$) жұмыс істейді және оның U-тәрізді сипаты қозғалтқыштың U-тәрізді сипатына ұқсас, құрастырылу негіздері бірдей (төмен қарай қисайған, 13.1-сурет). Синхронды компенсатордың сипатында оның тыс аса қоздырғыш және озыңқы (сыйымдылықты) зәкір тогының оң

жақ бөлігі жұмыс істейді. Қоздыру тогы автоматты құрылғылармен реттеледі.

Егер электр жүйесінде сыйымды ток басымырақ болса, онда оған жете қозбаған жұмыс істейтін синхронды компенсатор қосылуы мүмкін.

Электр жүйесінің қуат коэффициенті, әдетте 0,95-ден аспайды. Өйткені қуат коэффициентін көтеру үшін синхронды компенсатордың қуатын ұлғайту қажет, бұл жағдайда кейбір $\cos\varphi$ мәнінен бастап оның қуатын ұлғайтудан келетін экономикалық тиімділік нөлге тең болады.

Компенсаторды тоқты қолданатын жерлерге барынша жақын орналастыру керек, бұл электр стансасының ғана емес, сонымен қатар электр тарату желісінің де реактивтік тогын азайтады.

Тұтынушының қуат коэффициентін $\cos\varphi$ мәнінен $\cos\varphi'$ мәніне дейін көтеруге қажетті синхронды компенсатордың $Q_{\text{СК}}$ қуатын осы екі қуат коэффициенті $Q_{\text{СК}} = Q - Q'$ болғанда, тораптағы реактивтік қуат мәндерінің айырмасы ретінде табады. Q және Q' қуатын тұтынушының берілген толық қуаты S және $Q = S\sin\varphi$; $Q' = S\sin\varphi'$ ($\cos\varphi'$ мәні $\cos\varphi$ қарағанда үлкен болады, онда $\sin\varphi' < \sin\varphi$ және $Q' < Q$) қуат коэффициенттерімен табылған φ пен φ' фазалық бұрыштары бойынша есептейді.

Үш фазалы тұтынушының толық қуаты тораптың U_c желілік кернеуі және I_c желілік ток арқылы $S = \sqrt{3}U_c I_c$ түрінде өрнектеледі. Онда, синхронды компенсаторды қосудан бұрын желілі ток

$I_c = \frac{S}{\sqrt{3}U_c}$ болады. Осы токтың белсенді құрама бөлігі

$$I_{c.a} = \frac{P}{\sqrt{3}U_c} = I_c \cos\varphi; \text{ болса, реактивті құрама } I_{c.p} = \frac{Q}{\sqrt{3}U_c} = I_c \sin\varphi.$$

бөлігі болады.

Синхронды компенсатор қосылғаннан кейін тораптағы токтың белсенді құрамдас бөлігі өзгермейді, өйткені компенсатор нөлдік белсенді $P_{\text{СК}} = 0$ қуатпен жұмыс істейді. Тораптағы токтың реактивті құрамдас бөлігі $I'_{c.p} = \frac{Q'}{\sqrt{3}U_c}$, тең болады, яғни компенсатор болмаған жағдаймен салыстырғанда, азаяды.

Компенсатор қосылған тораптағы толық ток $I'_c = \sqrt{I_{c.a}^2 + (I'_{c.p})^2}$ өз кезегінде, компенсаторсызға қарағанда аздау болады.

Үш фазалы реактивті синхронды қозғалтқышта зәкірдің (статордың) үш фазалы орамасы және айқын полюсті, бірақ қоздыру орамасы жоқ роторы болады. Реактивті қозғалтқыштың жұмыс қағидасы синхронды айқын полюсті машинаның реактивті электр магниттік қуатын пайдалануға негізделген (теңдеудегі екінші қосылғыш (12.6)). Реактивті қуат реактивті электрмагниттік иінкүшті M_p анықтайды (өрнектерді қараңыз (12.8)). Көрсетілген өрнектер синхронды машинаның кез келген жұмыс режиміне сәйкес келетінін, бірақ генераторлық режимде электрмагниттік иінкүш тежегіш, ал қозғалтқыштық режимде — айналмалы болатынын еске саламыз. M_p өрнегінде көрсетілгендей, бұл иінкүш айқын полюсті машинада синхронды индуктивті кедергілердің теңсіздігі x_q және x_d болғанда, нөлге тең болмайды. Реактивті қозғалтқышта M_p иінкүші айналдыру иінкүшінің жалғыз құрамдас бөлігі болып табылады, өйткені негізгі $M_{осн}$ иінкүші болмашы: қоздыру тогы болмағандықтан, E_0 ЭҚК нөлге жуық (қалған ЭҚК аз болады).

Реактивті қозғалтқыштарда асинхронды іске қосу орамадағы («сілекейлі тордағы») немесе ротордың жаппай қозғалтқыш бөліктегі токтың есебінен пайдаланылады. Қарапайым синхронды қозғалтқыштың реактивті инкүші айналмалы иінкүшке қарағанда біршама аз болғандықтан, іске қосқан кезде біліктің жүктемесі номиналды 30% нормадан аспауы тиіс, әйтпесе ол синхронизмге тартылмайды.

Қуаты бір ваттан бірнеше жүздеген ватка дейінгі *бір фазалы реактивті қозғалтқыштар* кеңінен қолданылады. Мұндай қозғалтқыштарды іске қосу бір фазалы (соның ішінде компенсаторлық) асинхронды қозғалтқыштарды іске қосқандай қолданыстағы және іске қосатын орамалармен жасалған айналмалы магнитті өрістің есебінен жүзеге асырылады (10.2-бөлімін қараңыз).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Үш фазалы синхронды қозғалтқыштың жұмыс қағидасы неге негізделген? Айналу жиілігі неге байланысты?
2. Синхронды қозғалтқыш қарапайым желіге қосылғанда неліктен айналмайды? Синхронды қозғалтқышты іске қосудың қандай тәсілдерін білесіз?
3. Синхронды қозғалтқыштың жұмыс сипатының түрлерін сипаттаңыз, түсіндіріңіз.
4. Синхронды қозғалтқыштың U-тәрізді сипаттамалары нені білдіреді? Оның синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамасынан айырмашылығы неде? Қандай жағдайда қозғалтқыш зәкірінің тогы желінің кернеуіне қарағанда озыңқы және қандай жағдайда артта қалған болып есептеледі?
5. Синхронды компенсатор не үшін пайдаланылады? Синхронды қозғалтқыш пен синхронды компенсатордың жұмыс режимінің айырмашылығы мен конструктивтік айырмашылығы неде?
6. Реактивті синхронды қозғалтқыштың конструктивтік ерекшелігі неде? Оның жұмыс қағидасы неге негізделген?

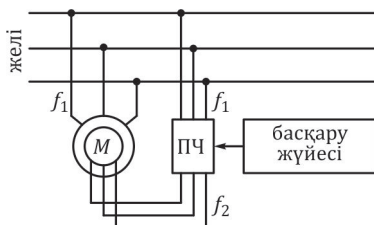
АЙНЫМАЛЫ ТОК МАШИНАЛАРЫНЫҢ БАСҚА ТҮРЛЕРІ

14.1. АСИНХРОНДАЛҒАН СИНХРОНДЫ МАШИНА

Қосарлы қуат беру машина деп аталатын *асинхрондалған синхронды машинаның* конструкциясы фазалық роторлы асинхронды машинаға ұқсас келеді (9.1-бөлімін қараңыз). Оның статоры мен роторына, әдетте, бөлек қуат беретін үш фазалы орама орналастырылады.

Статордың орамасы кернеу жиілігі f_1 желіден қуат алады, ал ротордың орамасына f_2 жиіліктегі кернеу тартылады, ең азы f деңгейінде болады. Бұл үшін басқарылатын тиристорлық жиілік түрлендіргіш (ЖТ) қолданылады (14.1-сурет). Басқару жүйесі ЖТ-дан шығатын тұстағы кернеудің жиілігі мен амплитудасын реттейді. Сондықтан жұмыс режимі синхронды болмайды. Асинхрондалған машиналар генераторлық режиммен қатар, қозғалтқыштық режимде де пайдаланылады.

Асинхрондалған машина *қозғалтқыштық режимде* жұмыс істегенде, ротор тогының жиілігі асинхронды қозғалтқыш үшін жазылып қойылған $f_2 = sf_1$ (9.7) өрнегімен белгіленген статор тогының жиілігімен байланысты болады. Статордың магнитті өрісінің айналу жиілігі n_1 мен ротордың айналу жиілігінің n айырмашылығының салыстырмалы шамасын s сырғу өрнегі көрсетеді. Сонымен қатар, статор тогы мен ротор тогының салыстырмалы шамасы $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$, өрнегіне негізделеді (9.2).



14.1.-сурет. Асинхрондалған синхронды машинаның іске қосылу сұлбасы.

Асинхронды және асинхрондалған машиналарды ажырату үшін соңғысының ротор жиілігі n_2 орнына n деп белгіленеді. Асинхронды машинадағы теңсіздік $n_2 > n_1$ генераторлық режимге сай келеді (9.9-бөлімін қараңыз). Асинхрондалған машина роторының айналу жиілігі статор өрісінің айналу жиілігіне қарағанда аз немесе көп мөлшерде болуы мүмкін. Ротордың айналу жиілігі ЖТ берген токтың өзгеруіне және ЖТ фазасының реттілігіне қарай өзгереді.

Асинхрондалған машина роторының айналу жиілігі мен статор, ротор тогының жиілігі арасындағы байланыс байқалады. Бұрын жазылған сырғу өрнегінен ротордың айналу жиілігін көрсетеміз. Тікелей осы байланысты $s = 1 - \frac{n}{n_1}$, өрнегі, осыдан $n = n_1(1-s)$ шығады. Сырғу ток (9.7) өрнекке сәйкес жиілікпен байланысты болғандықтан $s = \frac{f_2}{f_1}$, онда $n = n_1 \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right)$, немесе $n = n_1 \frac{f_1 - f_2}{f_1}$ болады. ЖТ фазасының алмасу тәртібінің өзгеру мүмкіндігін ескере отырып, бұл өрнекті төмендегідей түрде қорытамыз:

$$n = n_1 \frac{f_1 \mp f_2}{f_1}, \quad (14.1)$$

мұндағы минус таңбасы ЖТ фазасының тура тәртіптегі кезектілігіне (яғни, сатордың орамасын қуат алатын желінің фазасына) сәйкес келеді, ал плюс таңбасы фазаның кері тәртіптегі алмасуын білдіреді.

Алғашқы жағдайда ротордың айналу жиілігі статор өрісінің айналу жиілігіне қарағанда аз, екіншісінде көп болады. Мысалы, егер қозғалтқыштың статорының орамасы 50 Гц жиілік кернеумен қуат беріп, ал ротор орамасы 10 Гц жиілік кернеумен қуат берсе, айналу жиілігі жұп полюстерде 40 немесе 60 а/с (2 400 немесе 3 600 а/мин) болады. Соңында, егер ротор тогының жиілігі нөлге тең болғанда, машина кәдімгі синхронды қозғалтқыштай жұмыс істейді.

Асинхрондалған синхронды машина роторының орамасында асинхронды машинадағыдай E_2 ЭҚК индукцияланады. Егер ЖТ-дан ротордың орамасына жүргізілген кернеу фаза бойынша E_2 ЭҚК сәйкес келсе, бұл кернеу өзгерген жағдайда айналу жиілігі реттеледі. Егер кернеу фазасын өзгертсе, машинаның реактивті қуаты, яғни $\cos \varphi$ коэффициентінің қуаты өзгереді.

Энергия жүйесінде генераторлық режимде жұмыс істейтін асинхрондалған машинаның қарапайым синхронды генератормен салыстырғанда артықшылығы — *динамикалық тұрақтылығының жоғарылығында*, яғни, синхрондықтан шықпау мүмкіндігінде, со-

ның ішінде реактивті қуатты пайдалану режимінде. Бұл аталған артықшылық қуат көзінің мол кезінде білінеді. Генераторлар жұмысының тұрақтылығы кернеу жиі өзгеретін кең масштабтағы энергия жүйелеріндегі өзекті мәселе, себебі кернеудің тұрақсыздығы кей жағдайларды ауыр апаттарға соқтырады.

Ресейде асинхрондалған машиналарды «Электросила» зауыты шығарады. Мұндай машиналар Мәскеу мен Мәскеу маңындағы бірнеше электр станцияларында орнатылған. Асинхрондалған машиналарды енгізудегі басты міндеттердің бірі – заманауи тез әсер ететін компьютерлерді қолданатын тиімді басқару жүйесін жасау.

Асинхрондалған машиналарды пайдаланудың бірнеше қосымша мысалдарын келтіреміз.

Жұп полюсті синхронды турбогенератордың роторы турбинадан 6000 а/мин жиілікпен айналса, мұндай генератор 100 Гц жиіліктегі ЭҚК өндіреді (11.2-бөлімін қараңыз. Өндірістік 50 Гц жиілікке қол жеткізу үшін жиілік түрлендіргіш қажет. Алайда, кәдімгі синхронды генератордың орнына асинхрондалған машина орнатылса, көрсетілген ЭҚК 50 Гц айналу жиілігі ротордың орамасына фазалық кері айналу тәртібінде үш фазалы қуат беріледі (10.5-бөлімін қараңыз).

Кері мысал: егер ротордың орамасына торап кернеуі фазалық кері айналу ретінде берілсе, асинхрондалған қозғалтқыштың айналу жиілігі 6000 а/мин болады.

Асинхрондалған машиналар торап аралық жиілікті 50 және 60 Гц арасында түрлендіре алады. Бұл үшін екі білікпен жалғастырылған екі бірдей машина пайдаланылады. Екі машинаның роторлары жиілігі 5 Гц болатын үш фазалы кернеумен қуат алады, бірақ фазалардың айналу кезектілігі әртүрлі болады.

Асинхрондалған машиналарды аса жоғары сападағы электр энергиясын талап ететін тораптарда қолдану – өзекті мәселе. Бұл мәселенің өзектілігі, әсіресе, энергияны шетелдік тұтынушыларға сатқан кезде өткір сезіледі.

Бұл типтегі машинаның әрі қарай дами түсуі — келешектің еншісінде.

Тұрақты ток қозғалтқышын реверстеу мәселесін қарау кезінде қуат беру көзі полярлығының қозғалтқыштың айналу бағытын өзгерте алмайтындығы байқалды, себебі бұл жағдайда зәкір тогы мен қоздыру тогының бағыттары бір бағытта өзгереді (3.5-бөлімін қараңыз). Сондықтан, егер жүйелі және параллель қоздыру тұрақты ток қозғалтқышын айнымалы ток көзіне қосса, қозғалтқыш айналады. Тораптан келетін тұрақты және ауыспалы кернеуге арналған қозғалтқыштар *әмбебап коллекторлы қозғалтқыш* деп аталады және электр құралдарында, тігін машиналарында, бор машиналарда, желдеткіштерде, шаң сорғыштарда, кофе ұнтақтағыштарда, электр ұстараларында және басқа да тұрмыстық құралдарда және автоматика сұлбасының атқарушы қозғалтқышы ретінде пайдаланылады. Бұл қозғалтқыштардың асинхрондыларға қарағандағы артықшылығы сонда – олар айналу жиілігін үнемді және бірқалыпты реттейді және жоғарғы коэффициентті қуатпен жұмыс істей алады. Әмбебап қозғалтқыштар айнымалы ток желісінен өте жоғары 40000 а/мин айналу жылдамдығын жасауға мүмкіндік береді, ал мұндай мүмкіндікті 50 Гц кернеу жиілігінде синхронды және асинхронды машиналар көмегімен ала алмайды. Әмбебап коллекторлардың қозғалтқыштарының айналу жиілігі қалыпты қоздыру тұрақты ток қозғалтқышы сияқты реттеледі: жеткізілген ток кернеуін өзгертеді және қоздыру орамасын тұйықтайды (3.7-бөлімін қараңыз).

Коллекторлы машинаны айнымалы токпен қуат бергенде оның магнитті тізбектерінде құйынды токтар пайда болады, яғни жылу шығыны жоғары болады. Құйынды токтарды азайту үшін әмбебап коллекторлы машинаның тұғыры мен полюсі дестеленген, яғни электр техникалық болат тақташалардан жасалған болуы тиіс.

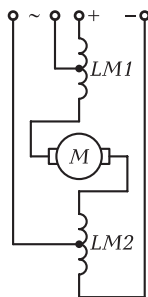
Айнымалы токпен жұмыс істегенде коллекторлы қозғалтқыштың коммутация шарттары тұрақты токпен жұмыс істегенге қарағанда төмендеу болатыны полюстер ағындарымен өтіп тұрады және соның нәтижесінде пайда болатын трансформаторлық ЭҚК-нің әсерінен болады. *Трансформаторлық ЭҚК*-ні азайту үшін магнитті тасқынның амплитудасын азайту қажет. Қозғалтқыш қуаты өзгермес үшін полюс санын көбейту қажет.

Айнымалы ток желісінде қоздыру орамасы үлкен индуктивтік қарсылықта болады. Бұл, әсіресе, қоздыру орамасында көптеген орамдары бар параллель қоздыру қозғалтқышына қатысты. Бұл

жағдайда қоздыру тогы фазалық кернеуден біраз артта қалып отырады. Нәтижесінде зәкір тогы мен қоздыру тогы арасындағы фазалардың үлкен ығысу бұрышы пайда болады да, айналу иінкүшінің мәні теңдеумен анықталатын мәніне қарағанда көп болмайды (3.10).

Сол себепті әмбебап коллекторлы қозғалтқыштар жүйелі қоздыру тәртібімен жұмыс істейді, бірақ айнымалы токпен жұмыс істегенде орамдардың саны азаяды. Ол үшін қоздыру орамасында аралық шықпаларын жасайды және айнымалы ток торабына қоздыру орамасының бір бөлігін ғана қосады (14.2-сурет).

Әмбебап коллекторлы қозғалтқыштың айнымалы токпен жұмыс істегендегі сипаты, тұрақты токпен жұмысына қарағанда төмендеу болады.



14.2.-сурет. Әмбебап коллекторлы қозғалтқыш.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Асинхрондалған синхронды машинаның конструкциясы мен қуат беру тәсілінің ерекшеліктері неде?
2. Асинхрондалған машинада ротордың айналу жиілігі статор өрісінің айналу жиілігі мен статор және ротор тогының жиілігіне қатысы қандай? Асинхрондалған синхронды машинаның айналу жиілігі қалай реттеледі?
3. Асинхрондалған синхронды машинаны қолдану мысалдарын келтіріңіз.
4. Коллекторлы қозғалтқыштың айнымалы ток торабынан жұмыс істеу мүмкіндігін дәлелдеңіз.
5. Асинхронды және синхронды қозғалтқыштарға қарағанда әмбебап коллекторлы қозғалтқыштың артықшылығы мен кемшілігі неде?
6. Әмбебап коллекторлы қозғалтқыштың тұрақты ток желісіне арналған коллекторлы қозғалтқыштан конструктивті айырмашылығы неде? Бұл айырмашылықтар неге негізделген?

1. Данилов И.А. Электроника негіздерімен жалпы электротехника / И.А. Данилов, И.Иванов. - М.: Высш. Шк., 1998 ж.
2. Жерве Г. К. Электр машиналарын желдету / Г. К. Жерве - Л.: Энергоатомиздат, 1989 ж.
3. Кацман, М.М., электр машиналары / М.М. Кацман. - М.: «Академия» баспа орталығы, 2014 ж.
4. Китаев В.Э. Электр машиналары / В.А.Китаев, Ю.М. Корчов, В.К. Свирин. - М.: Высш. Шк., 1978 ж.
5. Попов В.С. Электроника негіздерімен жалпы электротехника / В.С. Попов, С.А. Николаев. - М.: Энергия, 1977 ж.
6. Рожкова Л.Д. Станциялар мен қосалқы станциялардың электр жабдықтары / Л.Д. Рожкова, В.Козулин. - М.: Энергаториздат, 1987 ж.
7. Токарев Б.Ф. электр машиналары / Б. Ф. Токарев. - М.: Энергаториздат, 1989 ж.

Алғысөз	3
Кіріспе	4
I-БӨЛІМ. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫ	
1-тарау. Жалпы сұрақтар	14
1.1. Тұрақты ток генераторының әрекет қағидасы	14
1.2. Тұрақты ток машинаның конструкциясы	18
1.3. Тұрақты ток машина зәкірінің орамалары туралы жалпы мәліметтер	23
1.4. Ілмекті орамалар	25
1.5. Толқынды орамалар және аралас түрдегі орама	31
1.6. Тұрақты ток машинаның зәкір реакциясы	35
1.7. Тұрақты ток машинадағы коммутация	38
1.8. Коммутацияны жетілдіру тәсілдері	42
2-тарау. Тұрақты ток генераторлары	48
2.1. ПӘК және тұрақты ток генераторының энергетикалық диаграммасы	48
2.2. Тұрақты ток генератордың электр қозғаушы күші	51
2.3. Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток генераторы	53
2.4. Параллель қоздырудың тұрақты ток генераторы. Өзін-өзі қоздыру	60
2.5. Жүйелі және аралас қоздырудың тұрақты ток генераторлары	65
2.6. Тұрақты ток генераторлардың параллель жұмысы	68
2.7. Тұрақты ток генераторлардың арнайы түрлері	71
3-тарау. Тұрақты ток қозғалтқыштары	76
3.1. Тұрақты ток электр қозғалтқыш әрекетінің қағидасы	76
3.2. Тұрақты ток қозғалтқышының ПӘК және энергетикалық диаграммасы	80
3.3. Тұрақты ток қозғалтқышының электрмагнитті иінкүші ..	82
3.4. Параллель қозырудың тұрақты ток қозғалтқышы	87
3.5. Параллель қоздыру қозғалтқышының айналу жиілігін реттеу мен кері бұру	94
3.6. Тәуелсіз қоздырудың тұрақты ток қозғалтқышы	97
3.7. Жүйелі және аралас қоздырудың тұрақты ток қозғалтқыштары	101
3.8. Тұрақты ток қоздырғыштарының тежеуі	107
3.9. Тұрақты ток қозғалтқыштарының арнайы түрлері	110

II-БӨЛІМ. ТРАНСФОРМАТОРЛАР

4-тарау. Трансформаторлардың әрекет қағидасы және олардың құрылымы	118
4.1. Трансформаторлардың қызметі және әрекет қағидасы ...	118
4.2. Магнит өткізгіштері мен трансформаторлар орамаларының конструкциялары	122
5-тарау. Бір фазалы трансформаторлардың бос жүріс режимі, жұмыс режимі және қысқа тұйықталуы	128
5.1. Трансформатордың бос жүріс режимінің тәжірибесі	128
5.2. Жүктеме режимінде трансформаторлар жұмысы	137
5.3. Трансформатордың қысқа тұйықталу тәжірибесі	143
5.4. Трансформатордың қасиеттеріне қысқа тұйықталу мен бос жүріс тәжірибелерінде анықталатын параметрлердің әсері	147
6-тарау. Үш фазалы трансформаторлар және олардың параллель жұмысы	153
6.1. Үш фазалы қуатты трансформаторлардың конструкциялары	153
6.2. Үш фазалы трансформаторларды сынау және олардың параметрлерін анықтау	159
6.3. Үш фазалы трансформаторлардың орамаларын жалғау топтары	161
6.4. Үш фазалы трансформаторлардың параллельді жұмысы	167
7-тарау. Трансформаторлардың арнайы түрлері	172
7.1. Автотрансформаторлар	172
7.2. Көп орамалы трансформаторлар	174
7.3. Өлшеуіштік трансформаторлар	175
7.4. Трансформаторлардың басқа түрлері	178
III-БӨЛІМ. АЙНЫМАЛЫ ТОК МАШИНАЛАРЫ	
8-тарау. Жалпы мәселелер	184
8.1. Айналмалы магнит өрісі	184
8.2. Үш фазалы машинаның статоры	187
9-тарау. Айналмалы роторы бар үш фазалы асинхронды машиналар	197
9.1. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс қағидасы және құрылымы	197
9.2. Асинхронды қозғалтқыштың теңдеулері	202
9.3. Ротор орамасы параметрлерін статор орамасына келтіру	205
9.4. ПЭК пен асинхронды қозғалтқыш энергиясын жоғалту ..	211

9.5. Асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы ..	213
9.6. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары	217
9.7. Асинхронды қозғалтқышты іске қосу	219
9.8. Асинхронды қозғалтқыш роторының айналмалы жиілігін реттеу	225
9.9. Генераторлық тәртіп және асинхронды қозғалтқышты тежеу тәсілдері	231
10-тарау. Асинхронды машиналардың арнайы түрлері	236
10.1. Индукциялық реттегіш және фаза реттегіш	236
10.2. Бір фазалы және конденсаторлық асинхронды қозғалтқыштар	239
10.3. Атқарушы асинхронды қозғалтқыш	243
10.4. Асинхронды машиналардың синхронды байланысы ...	245
10.5. Асинхронды жиілік түрлендіргіш. Желілік асинхронды қозғалтқыш	248
11-тарау. Синхронды генераторлар	252
11.1. Синхронды генераторлар конструкциясының жалпы ерекшеліктері және жұмыс істеу қағидасы	252
11.2. Синхронды генераторлар түрлері	256
11.3. Синхронды генератор зәкірінің әсері	262
11.4. Синхронды генераторлардың векторлық диаграммалары	268
11.5. Синхронды генератордың сипаттамасы	273
11.6. Синхронды генератор параметрлерінің анықтамасы	279
11.7. Синхронды генераторларды қоздыру	283
11.8. Синхронды генераторларды салқындату	291
12-тарау. Синхронды генераторлардың параллельді жұмысы	295
12.1. Синхронды генераторларды параллельді жұмысына қосу	295
12.2. Генератордың желімен параллель жұмыс істеуі	299
12.3. Синхронды генератордың электрмагнитті қуаты	306
12.4. Синхронды генератор жұмысының тұрақтылығы	309
13-тарау. Синхронды қозғалтқыштар және компенсаторлар	314
13.1. Синхронды қозғалтқыш	314
13.2. Синхронды компенсатор	321
13.3. Реактивтік синхронды қозғалтқыш	323
14-тарау. Айнымалы ток машиналарының басқа түрлері	325
14.1. Асинхрондалған синхронды машина	325
14.2. Әмбебап коллекторлы қозғалтқыш	328
Әдебиеттер тізімі	330

Оқу басылымы

Лобзин Сергей Анатольевич

Электр машиналар

Оқулық

2-басылым, стереотипті

Редакторы *Нахмедова М.Б.*

Техникалық редакторы *Коржуева Е.Ф.*

Компьютерде беттеген: *Протасова Н.В.*

Корректоры *Котелина Н.Л., Ермакова И.А.*

№ 102115078 баспа. Басуға 17.02.2016 ж. қол қойылды. Пішімі 60×90/16.

Әріп түрі «Таймс». Офсеттік басылым. Офсеттік қағаз. № 1. Шартты баспа табағы. 21,0.

Таралымы 500 дана. Тапсырыс №

«Академия» баспа орталығы АҚБ. www.academia-moscow.ru 129085, Мәскеу, Мир даңғылы, 101В, 1 бет.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарлы-эпидемиологиялық қорытындысы 25.05.2015ж., № РОСС RU. АЕ51. Н 16679

«Первая образцовая типография» ААҚ баспа ұсынған электронды файлдарынан басылып шықты.